VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Tvorba sítě linek městské hromadné dopravy

Network Urban Mass Transportation Creation

Student: Bc. Jiří Kozelský

Vedoucí diplomové práce: Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Zadání diplomové práce

Student:	**Bc. Jiří Kozelský**
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	2301T003 Dopravní technika a technologie
Specializace:	20 Silniční doprava
Téma:	Tvorba sítě linek městské hromadné dopravy Network Urban Mass Transportation Creation

Zásady pro vypracování:

Cíl: Zabývat se porovnáním výsledků vybraných používaných k návrhu sítě linek městské hromadné dopravy a formulovat případná doporučení z hlediska výhodnosti jejich použití.

Osnova diplomové práce:

1. Úvod.
2. Definování problému a formulace cílů práce.
3. Význam systémů hromadné dopravy pro města a městské aglomerace.
4. Charakteristika vybraných metod sloužících k návrhu sítě linek MHD.
5. Aplikace vybraných metod v podmínkách zadané dopravní sítě.
6. Zhodnocení výsledků dosažených vybranými metodami a jejich srovnání.
7. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

Černý, J.; Kluvánek, P.: Základy matematickej teórie dopravy. Bratislava: VEDA, 1990. 279 s.. ISBN 80-224-0099-8
Surovec, P.: Provoz a ekonomika silniční dopravy I. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2000. 119 s.. ISBN 80-7078-735-X

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ-TECHNICKÁ UNIVERZITA Fakulta strojní 2 OSTRAVA

doc. Ing. Vladimír Smrž, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ………………..   …………………………

podpis diplomanta

Prohlašuji, že

- jsem byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: …………

………………………

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Jiří Kozelský

Adresa trvalého pobytu autora práce: Brumovská 540

Valašské Klobouky

okr. Zlín

Anotace diplomové práce

KOZELSKÝ, J. Tvorba sítě linek městské hromadné dopravy: diplomová práce, Ostrava. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2010, 73 s., Vedoucí práce: Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

V současné době existuje celá řada metod, která se zabývá tvorbou sítě linek městské hromadné dopravy. V přiložené diplomové práci se budu zabývat tvorbou sítě linek MHD pomocí dvou metod. Jedná se o metodu založenou na analýze současného stavu přemísťování osob a metodu PRIVOL. V rámci práce bude úkolem porovnat dosažené výsledky obou metod a popřípadě formulovat případná doporučení z hlediska výhodnosti jejich použití.

Annotation of master thesis

KOZELSKÝ, J Network Urban Mass Transportation Creation: Master Thesis,Ostrava. VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2010, 73 p. Thesis head: Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Currently, there are many methods, about creating public transport network. My thesis describe two method of creating public transport network. First method is based on analysis of current state transport people, and second is method PRIVOL. Thesis will compare both methods and describe advantages each of them.

Obsah

Seznam použitého značení

$^{1}L_{Po\text{-}Pá}$	počet ujetých kilometrů za jeden den na lince v rozmezí Po-Pá	[km.den^{-1}]
$^{1}L_{So,Ne,S}$	počet ujetých kilometrů za jeden den na lince o So, Ne a svátcích	[km.den^{-1}]
$^{100mkm}L_{r}$	100 místových kilometrů na dané lince za rok	[-]
$^{1}L_{km,Po\text{-}Pá}$	dopravní výkon v rozmezí Po-Pá	[km.den^{-1}]
$^{1}L_{km,So\text{-}Ne,S}$	dopravní výkon v rozmezí So, Ne a svátcích	[km.den^{-1}]
C_{kl}	pořizovací cena jednoho kloubového vozidla	[Kč]
C_{st}	pořizovací cena vozidla	[Kč]
C_{str}	pořizovací cena jednoho standardního vozidla	[Kč]
C_{t}	pořizovací cena vozidla	[Kč]
D_{prac}	počet pracovních dní v roce	[-]
$D_{So,Ne,S}$	počet dní pracovního volna v roce	[-]
IN	celkové investiční náklady	[Kč]
INO	investiční náklady objektů, zařízení a vybavení pro příslušný druh dopravního prostředku	[Kč]
INV	investiční náklady na pořízení vozidel	[Kč]
J	množina typů vozidel	[-]
J_{i}	množina typů vozidel v rámci druhu dopravního prostředku $i \in I$	[-]
K	kapacita vozidla	[míst.vozidlo^{-1}]
K	počet vozidel	[-]

K_{ij}	počet vozidel druhu $i \in I$ typu $j \in J_i$	[-]
K_j	počet vozidel typu $j \in J$	[-]
K_l	kapacita vozidla obsluhující linku l	[míst.vozidlo^{-1}]
L_{01}	počet ujetých kilometrů bez cestujících	[km]
L_{02}	počet ujetých bez cestujících	[km]
L_h	množina linek obsluhující hranu $h \in H$	[-]
L_r	celkový počet ujetých kilometrů na dané lince za rok	[km.rok^{-1}]
L_{se}	počet ujetých kilometrů na lince v sedle	[km]
$L_{šp}$	počet ujetých kilometrů na lince ve špičce	[km]
MHD	městská hromadná doprava	
$^{mkm}L_r$	počet místových kilometrů na dané lince za rok	[mkm.rok^{-1}]
N_{celk}	celkový počet pracovníků v podniku	[osob]
$N_{cšpAk}$	celkový počet kloubových vozidel jezdících ve špičce	[vozidel]
$N_{cšpAs}$	celkový počet klasických vozidel jezdících ve špičce	[vozidel]
N_d	počet dílenských pracovníků na jedno vozidlo evidenčního stavu	[osob.vozidlo^{-1}]
N_{ev}	počet vozidel v evidenci	[vozidel]
N_{evc}	počet vozidel v evidenci celkem	[vozidel]
N_l	počet oběhů vozidla na lince $l \in L_0$ za zvolenou čas. jednot.	[h^{-1}]
$N_ř$	počet řidičů na jedno vozidlo v provozu	[osob.vozidlo^{-1}]
$N_{řid}$	celkový počet řidičů	[osob]
N_{se}	počet vozidel v provozu v průměrné sedlové hodině	[vozidel]
$N_{šp}$	počet vozidel v provozu v maximální špičkové hodině	[vozidel]
$N_{špl}$	počet vozidel v provozu v maximální špičkové hodině	[vozidel]

N_{THP}	počet THP pracovníků	[osob]
N_{THPP}	podíl počtu THP a jiných pracovníků na celkovém počtu	[-]
$N_{Úao}$	počet pracovníků údržby a oprav	[osob]
O_a	odpisy vozidel	[-]
O_{hmax}	maximální intenzita přepravního proudu	[osob.h^{-1}]
O_{hse}	počet přepravených osob v průměrné sedlové hodině	[osob.h^{-1}]
$O_{hšp}$	počet přepravených osob v maximální špičkové hodině	[osob.h^{-1}]
O_t	odpisy vozidel	[-]
O_{tr}	odpisy trakčního systému	[-]
T	prohibitivní konstanta	[-]
X_{lij}	počet vozidel přidělených lince $l \in L_0$, druhu $i \in I$,	
	typu $j \in J$	[vozidel]
VH_{ev}	vozohodiny v evidenci	[h]
$VH_{nč}$	vozohodiny v nečinnosti	[h]
VH_{pr}	vozohodiny v provozu	[h]
VN_a	vlastní náklady na autobusy	[tis.Kč.rok^{-1}]
VN_{celk}	celkové úplné vlastní náklady	[Kč]
$VN_{nepř}$	vlastní náklady nepřímé	[Kč.100mkm^{-1}]
$VN_{př}$	vlastní náklady přímé	[Kč.100mkm^{-1}]
VN_{Tr}	vlastní náklady na trolejové vedení za rok	[tis.Kč.rok^{-1}]
X_l	počet vozidel, které budou přiděleny lince $l \in L_0$	[vozidel]
X_{lj}	počet vozidel typu $j \in J$ přidělených lince $l \in L_0$	[vozidel]
Z^+	množina celých kladných čísel	[-]
a_{lh}	člen hranovo – linkové matice A	[-]

i_{se}	interval linky v sedle	[min]
i_{se}	interval linky v sedle	[min]
$i_{šp}$	interval linky ve špičce	[min]
k	kapacita vozidla	[míst.vozidlo^{-1}]
k_i	kapacita vozidel typu j ∈ J	[míst]
k_{ij}	kapacita vozidel (počet míst) druhu $i \in I$, typu $j \in J_{\mathrm{i}}$	[míst]
l_z	provozní délka linky	[km]
l_{zpom}	délka linky pro stanovení odpisů na trolejové vedení	[km]
q_h	intenzita cestujících na hraně $h \in H$	[osob.h^{-1}]
${}^{se}t_{pr}$	doba provozu na lince v sedle	[h]
${}^{šp}t_{pr}$	doba provozu na lince ve špičce	[h]
t_c	cestovní doba	[min]
t_{cpom}	cestovní čas pro výpočet odpisů na trolejové vedení	[min]
t_k	doba zdržení na konečné zastávce	[min]
t_l	doba linky	[min]
t_o	oběžná doba linky	[min]
t_{pr}	doba provozu na lince	[h]
v_c	cestovní rychlost vozidla	[km.h^{-1}]
y	minimální poměrná rezerva	[-]
z_{li}	proměnná modelující přiřazení druhu dopravního prostředku $i \in I$ lince $l \in L_0$	[-]
α_{tp}	součinitel technické pohotovosti v den Po – Pá	[-]
γ	průměrné využití obsaditelnosti vozidla	[-]
ε	součinitel přepravní nerovnoměrnosti	[-]

1 Úvod

Městská hromadná doprava patří k základním pilířům dopravní soustavy každého vyspělého státu. Na rozsahu služeb poskytovaných městskou hromadnou dopravou závisí zpravidla funkce celého osídleného území a měst.

Nárůst významu městské hromadné dopravy se očekává zejména v současnosti, kdy vlivem neustále se zvyšující intenzity individuální automobilové dopravy nastává v centrech či jiných částech měst, kde v průběhu dne dochází k vysoké koncentraci obyvatelstva, ke zhoršování životních podmínek.

Aby se využívání veřejné hromadné dopravy obyvatelstvem zvyšovalo, musí být městská hromadná doprava pro potenciální zákazníky dostatečně atraktivní. Atraktivitu lze spatřovat nejen v rovině časové, prostorové a cenové dostupnosti, ale také komfortu při přepravě, minimalizaci přestupů, časové koordinaci spojů obsluhujících dopravní síť a zjednodušení tarifních podmínek pro používání veřejné hromadné dopravy v dotčeném spádovém území. Aby byla městská hromadná doprava cenově dostupná, musí být výrazně dotována z veřejných rozpočtů (zpravidla rozpočtů měst).

Atraktivitu městské hromadné dopravy však nelze zvyšovat nad únosnou míru z hlediska dotační náročnosti. Při omezených finančních zdrojích existuje ze strany poskytovatelů dotací oprávněný tlak na snižování dotační náročnosti městské hromadné dopravy. Tomuto trendu se musí přizpůsobit i provozovatelé městské hromadné dopravy a hledat v rámci své nabídky nevyužité rezervy, jejichž redukcí by byl zahájen proces postupného zhospodárňování provozu.

2 Definování problémů a cílů práce

Jednou z možností zatraktivnění městské hromadné dopravy je optimalizace přepravní nabídky prostřednictvím efektivního vedení tras linek.

K návrhu sítě linek byla v minulosti sestavena celá řada metod. Existuje-li pro řešení určitého problému více metod (často založených na využívání různých řešících nástrojů), je žádoucí zabývat se porovnáváním jejich výsledků. Problematika porovnávání výsledků různých metod není v literatuře příliš zastoupena, proto cílem práce tedy bude zabývat se porovnáním výsledků dvou metod založených na zcela odlišných řešících základech a formulací případných doporučení, které vyplynou z uvedeného porovnání.

3 Význam systému hromadné dopravy pro města a městské aglomerace

Jak již bylo uvedeno, patří městská hromadná doprava v současnosti k základním pilířům dopravní soustavy každého státu. Městská hromadná doprava (dále jen MHD) je důležitá hlavně proto, že umožňuje zvládnutí velkých přepravních požadavků.

Mezi hlavní výhody MHD patří zejména :

- malé nároky na dopravní plochy,
- větší bezpečnost a
- relativně menší negativní ovlivňování životního prostředí.

Městská hromadná doprava zajišťuje především přepravu obyvatelstva mezi bydlištěm a pracovištěm, vzdělávacími zařízeními, místy, ve kterých je poskytována lékařská péče, za kulturou, sportem či jinými volnočasovými aktivitami a zpět.

MHD slouží tedy k uspokojování potřeb přemísťování obyvatel na kratší vzdálenosti. Bývá zpravidla základem tzv. integrovaných dopravních systémů. Integrovanými dopravními systémy se rozumí takové způsoby organizace veřejné dopravy, které umožňují efektivně využívat výhod jednotlivých druhů dopravy odstraňující zbytečné duplicity v přepravní nabídce různých druhů dopravy, příp. různých dopravců. Základními požadavky kladenými na integrované dopravní systémy z hlediska cestujícího jsou přehlednost systému MHD, jednoduchost z pohledu administrativních úkonů souvisejících s pořizováním jízdních dokladů a efektivní cestování z hlediska času.

Na druhé straně je na MHD kladen požadavek, aby její provoz byl ufinancovatelný. Z uvedeného důvodu existují oprávněné zájmy o zdokonalování organizace provozních činností, resp. sladění veškeré řídící, plánovací, organizační, tarifní a investiční činnosti.

MHD musí nejen zajišťovat přepravní požadavky společnosti, ale musí také přispívat k celkovému hospodářskému rozvoji a k růstu životní úrovně obyvatelstva.

Uvedené problémy spadají do oblasti technologie provozu. Technologie provozu MHD je tvořena soustavou navzájem souvisejících, organizovaných a z hlediska prostoru a času řízených způsobů pohybů dopravních prostředků umožňujících přemísťování osob a jejich zavazadel v požadovaném čase mezi zvolenými místy. Technologie provozu MHD v sobě zahrnuje postupy týkající se zabezpečení provozu dopravních prostředků na dopravní síti. Dopravní síť, která je pevným podsystémem systému MHD je vymezena trasami a zástavkami obsluhovanými dle předem stanoveného časového harmonogramu tohoto provozu. K technologickým aspektům v MHD dále patří způsoby odbavování cestujících, organizace nástupů, výstupů, přestupů a v neposlední řadě také způsoby podávání informací.

Problematika technologických aspektů úzce souvisí s kvalitou nabízených služeb. Kvalita služeb nabízených MHD je posuzována podle celé řady kritérií formulovaných např. v [1]. Obecně je možno formulovat požadavek, že kvalita nabízených služeb musí být neustále hodnocena a musí být přijímána opatření vedoucí k jejímu zvyšování. V případě MHD platí tento požadavek dvojnásob. Systémy MHD totiž patří k dynamickým systémům, protože jsou neustále ovlivňovány vznikem a zánikem některých zdrojů a cílů cest obyvatelstva (budování supermarketů na periferiích měst apod.) Zvyšování kvality v MHD je možno dosahovat dvěma způsoby. Jednak jsou to akce investičně náročné (rozšiřování dopravní sítě, např. výstavba tramvajových a trolejbusových tratí, obnova vozidlového parku apod.), existují však méně i nákladné způsoby, jako je např. reorganizace vedení linek, předisponování vozidel mezi linkami, racionalizace oběhů vozidel apod.

Jak je z předchozího textu patrné, je technologie provozu MHD ovlivňována širokým spektrem různorodých činností. Stěžejním problémem však i nadále zůstává vytvoření systému vhodného vedení tras linek. Je to z důvodu toho, že efektivně vytvořená soustava tras linek bude na straně jedné minimalizovat dobu přepravy, minimalizovat nutnost přestupů cestujících, na druhé straně bude umožňovat hospodárný provoz vozidel MHD, což je, jak již bylo zmíněno dříve v textu, požadavek poskytovatelů dotací z veřejných rozpočtů.

V následující kapitole věnované teoretickým východiskům řešení bude provedena stručná charakteristika vybraných metod sloužících k návrhu sítě linek MHD.

4 Charakteristika vybraných metod sloužících k návrhu sítě linek MHD

V současné době existuje celá řada metod, které řeší problematiku návrhu sítě linek MHD. Jedná se jak o metody, které z hlediska definovaných kritérií umožňují nalezení optima (exaktní metody), tak i o metody heuristické, u kterých je optimalita navrženého řešení prokazatelná pouze ve výjimečných případech (jak bude uvedeno dále).

Každá z těchto metod se vyznačuje určitými výhodami i nevýhodami. Obecnou výhodou exaktních metod je deklarování nalezení optimálního řešení (nejsou-li modely velice rozsáhlé, např. desítky tisíc nezáporných celočíselných nebo bivalentních proměnných). K jejich použití je však mnohdy za účelem matematického namodelování některých omezení či optimalizačního kritéria zapotřebí přijmout určitá zjednodušení (neměnnost některých vstupních veličin apod.). Naproti tomu heuristické metody umožňují v některých případech určitou variabilitu vstupních dat. Jejich jednoznačnou nevýhodou však zůstává, že je při ukončení výpočtu garantováno nalezení zpravidla pouze lokálního optima. Existují samozřejmě i určitá vylepšení heuristických metod, jde o tzv. metaheuristické metody, které při splnění určitých, předem definovaných, podmínek umožňují opustit lokální minimum a přejít do jiných částí množiny přípustných řešení, ve kterých budou vyhledávána další lokální optima. Obecně však ani při použití metaheuristických metod není garantováno nalezení globálního optima. Je to mimo jiné i proto, že heuristiky ani metaheuristiky v sobě nemají zabudován test optimality. Bohužel, i přes uvedené nevýhody, se bez heuristik a metaheuristik při optimalizaci (zejména rozsáhlých úloh) nedá obejít. Jedinou možností, jak pomocí heuristik a metaheuristik najít optimum, je prohledat při řešení celou množinu přípustných řešení, což je však u úloh, kdy se heuristiky a metaheuristiky používají, víceméně pouze teoretická záležitost (výpočet by zpravidla překročil buď kapacitní možnosti výpočetní techniky, nebo by přesáhl dobu, kterou máme k provedení výpočtu k dispozici).

Ze širokého spektra metod používaných k návrhu sítě linek MHD byly vybrány dvě metody, jejichž výsledky budou porovnány. Bude se jednat o metodu založenou na analýze současného stavu přemísťování osob [1] a metodu označovanou v odborné literatuře názvem PRIVOL [3]. V následujícím textu budou obě metody nejdříve stručně charakterizovány.

4.1 Metoda založená na analýze současného stavu přemísťování osob

Jedná se o heuristickou metodu, která, jak již bylo uvedeno dříve, nezaručuje nalezení optimálního řešení. Výstupem z této metody jsou informace o vybraných linkách, počtech vozidel přidělených linkám, hodnotách technických ukazatelů navržených linek, nákladech na provoz linek, aj.

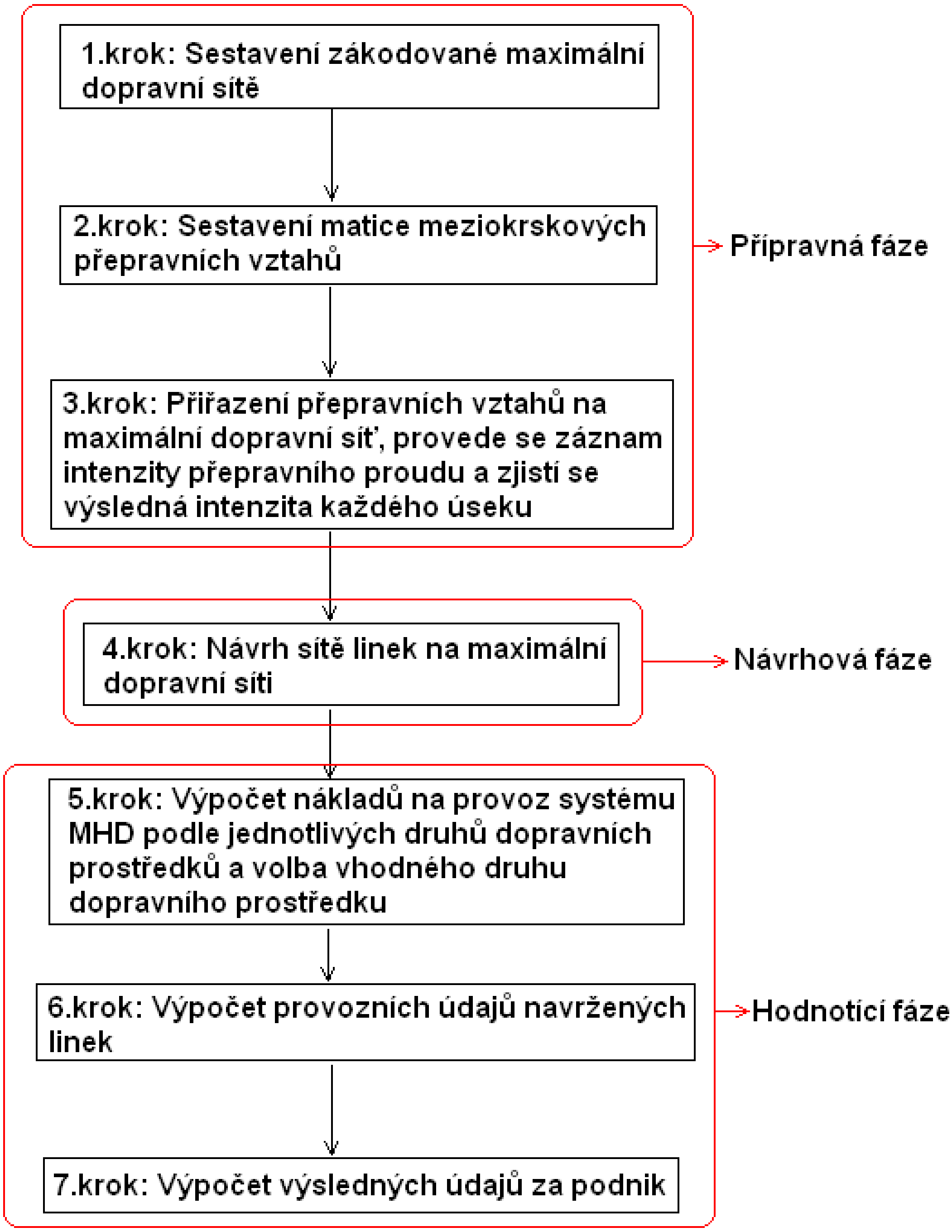
Výhody:

- relativní jednoduchost,
- neklade nároky na hlubší znalost metod matematické optimalizace a pořizování specifické softwarové podpory.

Nevýhody:

- jedná se o heuristickou metodu,
- existuje pouze omezená možnost řešit problémy velkých rozsahů,
- při návrhu sítě linek se uvažují pouze kyvadlové linky.

Na základě analýzy současného stavu přemísťování osob a obecně uznávané metodiky řešení je možné pro řešení problému návrhu sítě linek MHD navrhnout postup uvedený na obr. č.1. Při samotném výpočtu se uvažuje s jízdami nejkratším směrem, jedním druhem dopravního prostředku, neuvažuje se s zastávkami na hranách a doba linky je stejná v obou směrech.



Obr. č.1 – Schéma postupu řešení

4.1.1 Přípravná fáze metody

Přípravná fáze metody obsahuje z postupu navrženého na obr. č.1 první tři kroky.

1.krok: Sestavení zakódované maximální dopravní sítě. Maximální dopravní síť je tvořena všemi technicky způsobilými dopravními cestami pro uvažované dopravní prostředky hromadné osobní dopravy.

V maximální dopravní síti se vyskytují dvě množiny uzlů. První skupinu uzlů tvoří uzly reprezentující místa, v nichž se křižují nebo rozbíhají dopravní cesty, druhou skupinu uzlů tvoří uzly nazývané těžiště. Těžiště jsou místa zjednodušeně reprezentující tzv. dopravní okrsky. Při řešení se předpokládá, že do těžišť se koncentrují všechny zdrojové a cílové přepravní proudy týkající se daného okrsku.

Úseky maximální dopravní sítě reprezentují dopravní cesty vedoucí mezi dvojicemi uzlů. Každému úseku maximální dopravní sítě je přiřazeno určité ohodnocení reprezentující cestovní dobu. přes uvedený úsek.

2.krok: Sestavení matice meziokrskových přepravních vztahů pro zvolené časové období. Prvky matice reprezentují hodnoty intenzit cestujících za zvolené období mezi těžištěm reprezentovaným řádkem a těžištěm reprezentovaným sloupcem matice. V matici meziokrskových přepravních vztahů se uvádějí zpravidla hodinové intenzity, přičemž je uvažováno s hodinovými intenzitami v době maximálního zájmu o přepravu (průměrná špičková hodina). Obecně neplatí, že by matice musela být symetrická.

3. krok: Přiřazení přepravních vztahů na maximální dopravní síť metodou minimální trasy. Současně se provede záznam intenzity přepravního proudu mezi okrsky na všech úsecích maximální dopravní sítě spadajících do nejkratší trasy (z hlediska doby přepravy) a zjistí se výsledná intenzita každého úseku. Z hlediska teorie grafů se nejkratší trasou rozumí minimální cesta (cesta v grafu, pro kterou je charakteristické, že součet ohodnocení hran do této cesty zařazených je minimální).

Metoda nejkratší trasy je často používána pro svou jednoduchost. Je založena na předpokladu, že cestující si pro spojení mezi zdrojem a cílem cesty vybírá nejkratší trasu, obvykle časově nejvýhodnější. Přepravní vztah, jehož hodnota odpovídá hodnotě příslušného prvku z matice meziokrskových vztahů, je celý přiřazen na vyhledanou nejkratší trasu a ostatní trasy nejsou uvažovány. Volba přístupu přiřazování přepravních vztahů na maximální dopravní síť prostřednictvím metody nejkratší trasy v sobě skrývá určitá rizika, která je možno shrnout do následujících bodů:

- bude-li postupováno metodou nejkratší trasy, může dojít k tomu, že počet spojů na daném úseku může být vyšší, než je optimální počet z pohledu plynulosti a bezpečnosti. Může tak dojít k poklesu plynulosti, důsledkem poklesu plynulosti dojde ke zvýšení cestovní doby na úsecích, v důsledku toho se zvýší oběžná doba na linkách a tím i potřeba počtu vozidel,

- při řešení se uvažuje jen čas. Cestující je však při volbě trasy ovlivňován dalšími faktory, např. kvalitou přemístění, počtem přestupů, přesností a pravidelností dopravy, což přístup nezohledňuje (viz. předchozí bod),

- pro každého cestujícího může mít čas různou hodnotu v přepravní špičce, v přepravním sedle, v den pracovního volna nebo pracovního klidu.

Vyhledání nejkratší trasy lze provést několika algoritmy. Jednotlivé algoritmy řeší délky nejkratších tras mezi uzly. Výběr algoritmu závisí na typu úlohy, kterou chceme řešit. Typy řešených úloh:

- [A] z jednoho uzlu do jiného uzlu sítě,
- [B] z jednoho uzlu do každého uzlu sítě,
- [C] z každého uzlu do jednoho uzlu sítě,
- [D] mezi všemi dvojicemi, resp. uspořádanými dvojicemi uzlů sítě.

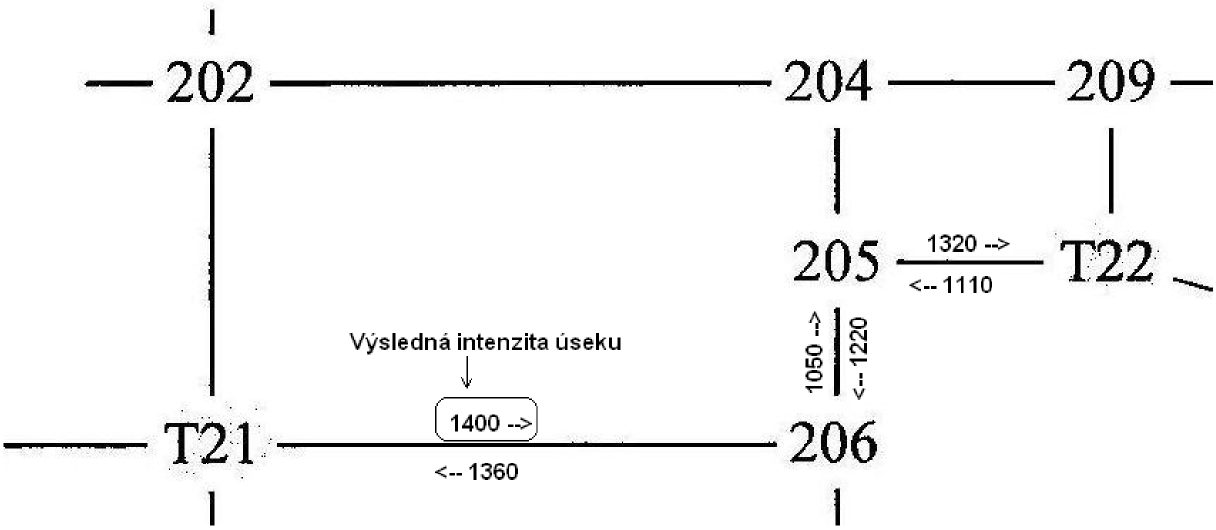
Úlohy typu [B] lze řešit podle obecného (Fordova) algoritmu, Dijkstrova algoritmu, Dantzigova algoritmu. Úlohy typu [D] řeší Floydův algoritmus. Úlohu typu [C] lze převést na úlohu typu [B] a řešit pomocí zmíněných algoritmů. Výsledky úlohy typu [A] lze vyčíst z ostatních typů úloh. V případě návrhu nejkratších tras mezi těžišti byl použit Fordův algoritmus.

Výsledky algoritmů se obvykle publikují v tabelární podobě, příklad fragmentu takové tabulky je uveden na obr. č.2.

Z – DO	Trasa	intenzita přepravního proudu [osob.h^{-1}]		vzdálenost	
		tam	zpět	[km]	[min]
T11 – T12	T11-114-109-110-111-T12	150	150	4,4	11
T11 – T13	T11-118-113-112-107-T13	220	220	4	10
T11 – T21	T11-118-113-108-102-208-206-T21	120	400	7,2	18

Obr. č.2 – Fragment tabulky nejkratších tras

Pro názornost je možno nejkratší trasy společně se zadanými intenzitami zaznačit do maximální dopravní sítě, jak je uvedeno na obr. č.3.



Obr. č.3 – Fragment maximální dopravní s uvedením intenzit přepravního proudu

Na obr. č.3 jsou uvedeny intenzity přepravního proudu mezi T21 a T22. Při dalších výpočtech se počítá s výslednou intenzitou na daném úseku. Jako výsledná intenzita pro daný úsek je vybrána intenzita cestujících v zatíženějším směru.

4.1.2 Návrhová fáze metody

Návrhová fáze metody obsahuje z postupu uvedeného na obr. č.1 krok č.4.

4. krok: Sestavení množiny linek na maximální dopravní síti. Vedení linek musí být v souladu s přepravními potřebami obyvatel. Nejintenzívnější přepravní vztahy je nutné uspokojovat přímými linkami (bez přestupů). Při návrhu tras jsou u relací, u kterých je alespoň v jednom směru intenzita přepravovaných osob minimálně 250 osob.h^{-1}, zavedeny přímé linky. V této fázi dochází rovněž k přidělování přepravních proudů vytvořené soustavě linek.

Uvažuje-li se větší počet zdrojů a cílů přepravních tras a nepřihlíží-li se pouze k nejkratším trasám, může nastat situace, kdy navržený počet linek bude značný. Tento problém lze vyřešit převedením intenzit přepravních proudů z úseků vyznačujících se nižší intenzitou cestujících na úseky zatížené vyššími intenzitami. Realizací uvedeného zjednodušení dojde ke snížení počtu obsluhovaných úseků a tím i ke snížení počtu možných linek. Je však třeba si uvědomit, že uvedenou úpravou může na druhé straně dojít ke zhoršení prostorové (a tedy i časové) dostupnosti systému MHD pro cestující, kteří vstupují nebo opouštějí systém MHD v nácestných zastávkách.

4.1.3 Hodnotící fáze metody

Hodnotící fáze metody obsahuje z postupu uvedeného na obr. č.1 kroky č.5 -7.

5.krok: Výpočet nákladů a poté volba dopravního prostředku MHD pro každou navrženou linku.

Výpočet nákladů probíhá v několika dílčích krocích. Postup začíná výpočtem provozních délek navržených linek, počtů vozidel nasazovaných v průměrné špičkové a sedlové hodině a vozidel v evidenci. Uvedené údaje pak budou tvořit vstupy do výpočtu vlastních nákladů. Postup výpočtu bude dále popsán podrobněji.

- výpočet provozní délky linky l_z:

$$l_z = \frac{v_c \cdot t_c}{60} \quad [\text{km}] \tag{4.1}$$

v_c – cestovní rychlost vozidla [km.h^{-1}]

t_c – cestovní doba [min]

- výpočet intervalu linky ve špičce $i_{šp}$:

$$i_{šp} = \frac{K \cdot \gamma \cdot 60}{O_{h\max}} \text{ [min]} \tag{4.2}$$

K - kapacita vozidla [míst.vozidlo^{-1}]

γ – průměrné využití obsaditelnosti vozidla [-]

O_{hmax} – maximální intenzita přepravního proudu na lince [osob.h^{-1}]

Pokud vyjde špičkový interval neceločíselný, zaokrouhluje se na celá čísla dolů.

- výpočet intervalu linky v sedle i_{se}:

$$i_{se} = i_{šp} \cdot \varepsilon \text{ [min]} \tag{4.3}$$

i_{se} – interval linky v sedle [min]

ε – součinitel přepravní nerovnoměrnosti [-]

$$\varepsilon = \frac{O_{hšp}}{O_{hse}} \text{ [-]} \tag{4.4}$$

$O_{hšp}$ – počet osob přepravených v maximální špičkové hodině nebo maximální intenzita přepravního proudu ve špičce [osob.h^{-1}]

O_{hse} – počet osob přepravených v průměrné sedlové hodině nebo průměrná intenzita přepravního proudu v době přepravního sedla [osob.h^{-1}]

Pokud vyjde interval linky v sedle neceločíselný, zaokrouhluje se opět na celá čísla dolů.

- výpočet oběžné doby linky t_o (je uvažováno, že l_z i v_c je stejná v obou směrech, t_k je stejná v obou konečných zastávkách):

$$t_o = 2 \cdot \left(\frac{l_z \cdot 60}{v_c} + t_k \right) \text{ [min]} \tag{4.5}$$

l_z - provozní délka linky [km]

v_c - cestovní rychlost vozidla [km.h^{-1}]

t_k - doba zdržení na konečné zastávce [min]

- výpočet počtu vozidel v provozu v maximální špičkové hodině $N_{šp}$:

$$N_{šp} = \frac{t_o}{i_{šp}} \text{ [vozidla]} \tag{4.6}$$

t_o – oběžná doba linky [min]

$i_{šp}$ – linkový interval dopravy v maximální špičkové hodině [min]

Pokud vyjde počet vozidel neceločíselný, zaokrouhluje se na celá čísla nahoru.

- výpočet počtu vozidel v průměrné sedlové hodině N_{se}:

$$N_{se} = \frac{t_o}{i_{se}} \text{ [vozidla]} \tag{4.7}$$

t_o – oběžná doba linky [min]

i_{se} - linkový interval dopravy v průměrné sedlové hodině [min]

Pokud vyjde počet vozidel neceločíselný, zaokrouhluje se na celá čísla nahoru.

- výpočet počtu vozidel v evidenci N_{ev} pro linku:

$$N_{ev} = \frac{N_{šp}}{\alpha_{tp}} \text{ [vozidla]} \tag{4.8}$$

$N_{šp}$ – počet vozidel v provozu na lince v maximální špičkové hodině [-]

α_{tp} – součinitel technické pohotovosti v den Po – Pá [-]

$$\alpha_{tp} = \frac{VH_{pr} + VH_{nč}}{VH_{ev}} \cdot 100 \text{ [-]} \tag{4.9}$$

VH_{pr} –vozohodiny v provozu, hodiny využité k přepravní práci [h]

$VH_{nč}$ – vozohodiny v nečinnosti [h]

VH_{ev} – vozohodiny v evidenci – norma doby provozu [h]

Pokud vyjde počet vozidel neceločíselný, zaokrouhluje se na celá čísla nahoru.

- výpočet vlastních nákladů na autobusy za rok VN_A:

$$VN_A = \frac{\left(VN_{př} + VN_{nepř}\right)^{100mkm} L_r + \left(O_a \cdot C_{st} \cdot N_{ev}\right)}{1000} \text{ [tis.Kč.rok}^{-1}\text{]} \tag{4.10}$$

$VN_{př}$ – vlastní náklady přímé [Kč.100mkm^{-1}]

$VN_{nepř}$ – vlastní náklady nepřímé [Kč.100mkm^{-1}]

${}^{100mkm}L_r$ - 100 místových kilometrů na dané lince za rok [-]

O_a – odpisy vozidel [-]

C_{st} – pořizovací cena vozidla [Kč]

N_{ev} - počet vozidel v evidenci [vozidel]

- výpočet délky linky pro stanovení odpisů na trolejové vedení l_{zpom}:

$$l_{zpom} = \frac{v_c \cdot t_{cpom}}{60} \text{ [km]} \tag{4.11}$$

v_c - cestovní rychlost vozidla [km.h^{-1}]

t_{cpom} – cestovní čas pro výpočet odpisů na trolejové vedení [min]

Rozdíl mezi l_z a l_{zpom} spočívá v tom, že pokud přes daný úsek vede více linek, tak délka úseku se započítává pouze jednou.

- výpočet vlastních nákladů na trolejbusy za rok VN_{Tr}:

$$VN_{Tr} = \frac{(VN_{př} + VN_{nepř}) \cdot {}^{100mkm}L_r + (O_t \cdot C_t \cdot N_{ev}) + (l_{zpom} \cdot O_{tr})}{1000} \text{ [tisKč.rok}^{-1}\text{]} \tag{4.12}$$

$VN_{př}$ – vlastní náklady přímé [Kč.100mkm^{-1}]

$VN_{nepř}$ – vlastní náklady nepřímé [Kč.100mkm^{-1}]

${}^{100mkm}L_r$ - 100 místových kilometrů na dané lince za rok [-]

O_t – odpisy vozidel [-]

C_t – pořizovací cena vozidla [Kč]

O_{tr} – odpisy trakčního systému [-]

N_{ev} - počet vozidel v evidenci [vozidel]

l_{zpom} - délka linky pro stanovení odpisů na trolejové vedení [km]

Při volbě dopravního prostředku se pro každou linku zpravidla primárně preferuje dopravní prostředek, u kterého jsou vyvolány nižší vlastní náklady (může se však stát, že výše vlastních nákladů nebude jediným kritériem).

6. krok: V dalším kroku se vypočítají provozní údaje navržených linek. Předpokládá se, že všechny spoje jsou vedeny vždy v celé délce linky. V tomto kroku se jedná o výpočty počtu ujetých kilometrů na lince. Vzorce pro výpočet těchto hodnot jsou uvedeny dále.

- výpočet doby linky t_l :

$$t_l = \frac{1}{2} \cdot t_o \ \text{[min]} \tag{4.13}$$

t_o – oběžná doba linky [min]

- výpočet počtu ujetých kilometrů na lince ve špičce $L_{šp}$:

$$L_{šp} = N_{šp} \cdot \frac{{}^{šp}t_{pr} \cdot 60}{t_l} \cdot l_z \ \text{[km]} \tag{4.14}$$

$N_{šp}$ – počet vozidel v provozu v maximální špičkové hodině [-]

${}^{šp}t_{pr}$ – doba provozu na lince ve špičce [h]

t_l – doba linky [min]

l_z - provozní délka linky [km]

- výpočet počtu ujetých kilometrů na lince v sedle L_{se}

$$L_{se} = N_{se} \cdot \frac{{}^{se}t_{pr} \cdot 60}{t_l} \cdot l_z \ \text{[km]} \tag{4.15}$$

N_{se} - počet vozidel v průměrné sedlové hodině [-]

${}^{se}t_{pr}$ – doba provozu na lince v sedle [h]

t_l – doba linky [min]

l_z - provozní délka linky [km]

- pozn. výraz $\frac{{}^{se}t_{pr} \cdot 60}{t_l}$ reprezentuje počet spojů, které obslouží jedno vozidlo v době sedla.

-výpočet počtu ujetých kilometrů za jeden den na lince v rozmezí Po-Pá ${}^{1}L_{Po-Pá}$:

$${}^{1}L_{Po-Pá} = L_{šp} + L_{se} \ [\text{km} \cdot \text{den}^{-1}] \tag{4.16}$$

L_{sp} – počet ujetých kilometrů za jeden den na lince ve špičce [km]

L_{se} - počet ujetých kilometrů za jeden den na lince v sedle [km]

- výpočet dopravního výkonu v rozmezí Po – Pá ${}^{1}L_{km,Po-Pá}$:

$${}^{1}L_{km,Po-Pá} = {}^{1}L_{Po-Pá} + L_{01} \ [\text{km} \cdot \text{den}^{-1}] \tag{4.17}$$

${}^{1}L_{Po-Pá}$ - počet ujetých kilometrů za jeden den na lince v rozmezí Po-Pá [km.den^{-1}]

L_{01} – počet ujetých kilometrů bez cestujících (přistavení a odstavení) [km]

- výpočet počtu ujetých kilometrů za 1 den na lince o So, Ne a svátcích ${}^{1}L_{So,Ne,S}$ (předpokládá se, že počet vozidel nasazených v So, Ne a svátcích odpovídá počtu vozidel nasazených v sedle)

$$ {}^{1}L_{So,Ne,S} = N_{se} \cdot \frac{t_{pr} \cdot 60}{t_l} \cdot l_z \ [\mathrm{km} \cdot \mathrm{den}^{-1}] \tag{4.18} $$

N_{se} - počet vozidel v průměrné sedlové hodině [-]

t_{pr} – doba provozu na lince [h]

t_l – doba linky [min]

l_z - provozní délka linky [km]

- výpočet dopravního výkonu v rozmezí So – Ne, S ${}^{1}L_{km,So\text{-}Ne,S}$:

$$ {}^{1}L_{km,So-Ne,S} = {}^{1}L_{So-Ne,S} + L_{02} \ [\mathrm{km} \cdot \mathrm{den}^{-1}] \tag{4.19} $$

${}^{1}L_{So-Ne,S}$ - počet ujetých kilometrů za jeden den na lince v rozmezí So – Ne, S [km.den^{-1}]

L_{02} – počet ujetých kilometrů bez cestujících (přistavení a odstavení) [km]

- výpočet celkových ujetých kilometrů na dané lince za rok L_r (přichází v úvahu, kdy se rozsah přepravní nabídky v průběhu roku nemění):

$$ L_r = D_{prac} \cdot {}^{1}L_{Po-Pá} + D_{So,Ne,S} \cdot {}^{1}L_{So,Ne,S} \ [\mathrm{km} \cdot \mathrm{r}ok^{-1}] \tag{4.20} $$

D_{prac} – počet pracovních dní v roce [-]

${}^{1}L_{Po\text{-}Pá}$ - počet ujetých kilometrů za jeden den na lince v rozmezí Po-Pá [km.den^{-1}]

$D_{So,Ne,S}$ – počet dní pracovního volna v roce [-]

${}^{1}L_{So,Ne,S}$ - počet ujetých km za 1 den na lince v So, Ne a svátcích [km.den^{-1}]

- výpočet místových kilometrů (nabídnutých) na dané lince za rok ${}^{mkm}L_r$ (přichází v úvahu, kdy se rozsah přepravní nabídky v průběhu roku nemění):

$$ {}^{mkm}L_r = L_r \cdot K_l \ [\mathrm{mkm.rok}^{-1}] \tag{4.21} $$

L_r – celkový počet ujetých kilometrů na dané lince za rok [km.rok^{-1}]

K_l - kapacita vozidel obsluhující linku l [míst.vozidlo^{-1}]

- výpočet 100 místových kilometrů na dané lince za rok ${}^{100mkm}L_r$ (přichází v úvahu, kdy se rozsah přepravní nabídky v průběhu roku nemění):

$$ {}^{100mkm}L_r = \frac{{}^{mkm}L_r}{100} \ [\mathrm{100mkm.rok}^{-1}] \tag{4.22} $$

$^{mkm}L_r$ – počet místových kilometrů na dané lince za rok [-]

Vypočítané hodnoty lze pro přehlednost opět zapsat do tabulky, jejíž záhlaví je uvedeno na obr. č.4.

Linka č.	$i_{šp}$	i_{se}	t_c	l_z	t_o	$N_{šp}$	N_{se}	Dopr.výkon Po - Pá	Dopr. výkon v So, Ne a S
	[min]	[min]	[min]	[km]	[min]	[voz.]	[voz.]	[km.den^{-1}]	[km.den^{-1}]

Obr. č.4 – Provozní údaje navržených linek

Výpočet počtu ujetých kilometrů z a do garáže:

Počty ujetých kilometrů vozidel na všech linkách z lokality, ve které jsou umístěny garáže (odstavné plochy) dopravce, je rovněž výhodné zpracovat tabelárně, viz obr. č.5.

Jízdy z a do garáže ve T13							
Linka č.	Konečná zastávka	Dojezdový čas na konečnou zastávku (min)	Dojezdová vzdálenost na konečnou zastávku (km)	Počet jízd ze T13 na konečnou zastávku a zpět denně (Po-Pá)	Počet jízd ze T23 na konečnou zastávku a zpět denně (So,Ne,S)	Celkem km za den (Po-Pá)	Celkem km za den (So,Ne,S)
1	T12	11	4,4	9	3	39,6	13,2
	T23	4	1,6	9	3	14,4	4,8

Obr. č.5 – Fragment vzorové tabulky pro linku č.1

7.krok: V tomto kroku jsou vypočítány výsledné údaje za podnik (evidenční stav vozidlového parku, počet pracovníků podniku celkem atd.).

- počet vozidel v evidenci celkem N_{evc} :

$$N_{evc} = \frac{\sum_{l \in L_p} N_{špl_l}}{\alpha_{tp}} \text{ [vozidel]} \qquad (4.23)$$

L_p – množina provozovaných linek

$N_{špl}$ – počet vozidel v provozu v maximální špičkové hodině na lince $l \in L_p$ [vozidel]

α_{tp} – součinitel technické pohotovosti v den Po – Pá [-]

- celkový počet řidičů $N_{řid}$:

$$N_{řid} = N_{ř} \cdot \sum_{l \in L_p} N_{šp_l} \text{ [osob]} \tag{4.24}$$

$N_{ř}$ – počet řidičů na jedno vozidlo v provozu [osob.voz^{-1}]

$N_{špl}$ – počet vozidel v provozu v maximální špičkové hodině na lince $l \in L_p$ [vozidel]

- počet pracovníků údržby a oprav $N_{ÚaO}$:

$$N_{ÚaO} = N_d \cdot N_{evc} \text{ [osob]} \tag{4.25}$$

N_d – počet dílenských pracovníků na jedno vozidlo evidenčního stavu [osob.voz^{-1}]

N_{evc} - počet vozidel v evidenci celkem [vozidel]

- celkový počet pracovníků v podniku N_{celk}:

$$N_{celk} = \frac{N_{řid} + N_{ÚaO}}{1 - N_{THPP}} \text{ [osob]} \tag{4.26}$$

N_{THPP} – podíl počtu THP a jiných pracovníků na celkovém počtu [-]

N_{celk} - celkový počet pracovníků v podniku [osob]

$N_{řid}$ - celkový počet řidičů [osob]

$N_{ÚaO}$ - počet pracovníků údržby a oprav [osob]

- počet THP pracovníků N_{THP}:

$$N_{THP} = N_{THPP} \cdot N_{celk} \text{ [osob]} \tag{4.27}$$

N_{THPP} – podíl počtu THP a jiných pracovníků na celkovém počtu [-]

N_{celk} - celkový počet pracovníků v podniku [osob]

- výpočet investičních nákladů na pořízení vozidel *INV*:

$$INV = \frac{N_{cšpAs}}{\alpha_{tp}} \cdot C_{str} + \frac{N_{cšpAk}}{\alpha_{tp}} \cdot C_{kl} \text{ [Kč]} \tag{4.28}$$

$N_{cšpAs}$ - celkový počet klasických vozidel jezdících ve špičce [vozidel]

$N_{cšpAk}$ - celkový počet kloubových vozidel jezdících ve špičce [vozidel]

α_{tp} – součinitel technické pohotovosti v den Po – Pá [-]

C_{str} – pořizovací cena jednoho standardního vozidla [Kč]

C_{kl} - pořizovací cena jednoho kloubového vozidla [Kč]

- výpočet celkových investičních nákladů *IN*:

$$IN = INV + INO \text{ [Kč]} \quad (4.29)$$

INV - investiční náklady na vozidla [Kč]

INO - investiční náklady objektů, zařízení a vybavení pro příslušný druh dopravního prostředku [Kč]

- výpočet celkových úplných vlastních nákladů V_{Ncelk} za rok:

$$V_{Ncelk} = \sum_{i=1}^{n} VN_i \text{ [Kč]} \quad (4.30)$$

VN_i – vlastní náklady vyplývající z provozu vozidla *i* za rok [Kč]

Tabulka výsledných údajů za podnik může mít tvar uvedený v tab. č.1.

Tab. č.1 – Tabulka výsledných údajů za podnik

Ukazatel	Jednotka	Hodnota
Evidenční stav vozidlového parku	[vozidel]	
Počet řidičů	[osob]	
Počet pracovníků THP	[osob]	
Počet pracovníků údržby	[osob]	
Počet pracovníků podniku celkem	[osob]	
Dopravní výkony celkem za rok	[km.rok^{-1}]	
	[místkm.rok^{-1}]	
Investiční náklady na vozidlo (INV)	[Kč.voz.$^{-1}$]	
Investiční náklady (IN)	[Kč]	
Celkové úplné vlastní náklady za rok	[Kč.rok^{-1}]	

4.2 Metoda PRIVOL

Jedná se o metodu, která umožňuje nalezení optimálního řešení v kontextu zvoleného optimalizačního kritéria. Metoda využívá lineárního programování. Výstupem z této metody jsou informace o trasách linek a o počtech vozidel, která jim jsou přidělena.

Výhody:

- možnost nalezení optimálního řešení,
- matematický model, jehož řešením získáme definované výsledky může být pojat jako jednokriteriální i vícekriteriální, díky rozvinuté softwarové podpoře lze řešit i problémy větších rozsahů,
- širší množina linek může obsahovat i okružní linky.

Nevýhody:

- metoda vyžaduje znalost řešícího aparátu lineárního programování a znalost procesu transformace sestaveného modelu do optimalizačního softwaru, případně znalost řešících metod (při ručním způsobu řešení),
- některé aspekty je obtížné namodelovat prostředky lineárního programování,
- řešící algoritmus vybírá linky z tzv. širší množiny linek, kterou vytváří řešitel. Existuje tak nebezpečí, že ten kdo definuje širší množinu linek, opomene zařadit do této množiny některé důležité dopravní spojení. Řešící algoritmus pochopitelně nedokáže tento problém odstranit.

Celý postup začíná, jak je v lineárním programování obvyklé, sestavením matematického modelu.

<u>Matematický model tvorby sítě městské hromadné dopravy:</u>

U matematického modelu musí být před jeho sestavením známy vstupní hodnoty, musí být definována rozhodnutí, která se po vyřešení úlohy očekávají, musí být znám seznam omezení, která musí být při řešení dodržena a musí být známo optimalizační kritérium, tj. veličina, jejíž hodnota má být v průběhu optimalizace minimalizována nebo maximalizována.

Formulace problému:

Je dána širší množina linek L_0, které mají obsluhovat danou oblast. Pro každou linku $l \in L_o$ je stanovena její oběžná doba O_l nebo počet oběhů N_l za zvolenou časovou jednotku. Širší množina linek L_0 bývá pro názornost znázorněna grafem. Vrcholy grafu reprezentujícího širší množinu linek představují místa, ve kterých je možno trasu linky ukončit nebo místa, ve kterých dochází k větvení sítě, hrany představují dopravní cesty mezi uvedenými místy. Pro každou hranu grafu je dáno ohodnocení, které představuje intenzitu cestujících, kteří v daném úseku požadují přepravu. Hrany mohou mít dvě ohodnocení, pro každý směr samostatně. Zpravidla se však pro další výpočty uvažuje s tzv. rozhodující intenzitou, tj. maximem z uvedených dvou hodnot (tak se např. postupuje, je – li širší množina linek tvořena pouze kyvadlovými linkami).

Metoda PRIVOL umožňuje zohlednit celou řadu optimalizačních kritérií. Nejčastěji se používají (a budou použity i pro potřeby předložené práce):

1, počet vozidel, která jsou nezbytná ke splnění požadavku, cílem optimalizace bude tento počet minimalizovat,
2, minimální poměrná rezerva mezi počtem nabízených míst na daném úseku za časovou jednotku a intenzitou cestujících za tutéž časovou jednotku při známém počtu vozidel, cílem optimalizace bude její hodnotu maximalizovat.

Matematické modely pro různé širší množiny linek se určitým způsobem odlišují. V předložené práci budou uvedeny různé varianty těchto modelů lišící se od sebe jak rozsahem vstupních údajů, tak rozsahem použitých proměnných.

K modelování rozhodnutí budou využity následující proměnné:

1, proměnné modelující počet vozidel přidělený jednotlivým linkám (ve všech variantách matematického modelu),
2, proměnné modelující minimální poměrnou rezervu mezi počtem nabízených míst na daném úseku za časovou jednotku a intenzitou cestujících za tutéž časovou jednotku při známém počtu vozidel (pouze u modelů, u kterých se hodnota této veličiny maximalizuje),
3, proměnné modelující přiřazení druhu dopravního prostředku lince (pouze v případě modelů zohledňujících více druhů dopravních prostředků).

I, homogenní vozidlový park:

Homogenním vozidlovým parkem bude pro potřeby předložené práce rozuměn vozidlový park tvořen vozidly se stejnou kapacitou.

Varianta matematického modelu Ia - minimalizace počtu vozidel:

Optimalizační kritérium musí vyjadřovat počet vozidel přidělený všem linkám ze širší množiny linek L_0. V případě modelů tykajících se výpočtu minimálního počtu vozidel je základní podmínkou, která zajišťuje přípustnost nalezeného řešení, podmínka zohledňující dodržení požadavku, že na každé hraně je nabízeno minimálně tolik míst, kolik je ve směru vyznačujícímu se rozhodující intenzitou cestujících průměrně požadováno.

Matematický model má v případě varianty Ia tvar:

$$\min f(x) = \sum_{l \in L_0} X_l \tag{4.31}$$

za podmínek:

$$\sum_{l \in L_h} N_l \cdot k \cdot X_l \geq q_h \quad pro\ h \in H \tag{4.32}$$

$$X_l \in Z^+ \cup \{0\} \qquad pro\ l \in L_0 \tag{4.33}$$

N_l – počet oběhů vozidla na lince $l \in L_0$ za zvolenou časovou jednotku [h^{-1}],
k – kapacita vozidla [míst.vozidlo^{-1}],
X_l – počet vozidel, které budou přiděleny lince $l \in L_0$ [vozidel],
q_h – intenzita cestujících na hraně $h \in H$ [osob.h^{-1}],
Z^+ - množina celých kladných čísel,
L_h – množina linek obsluhující hranu $h \in H$.

Pozn.
$N_l \cdot k$ - reprezentuje počet míst, která za zvolenou časovou jednotku nabídne na hraně $h \in H$ jedno vozidlo přidělené lince $l \in L_0$ v každém směru,
$N_l \cdot k \cdot X_l$- reprezentuje celkový počet míst, které nabídnou na hraně $h \in H$ všechna vozidla přidělená lince $l \in L_0$ za zvolenou časovou jednotku v každém směru,

$\sum_{l \in L_h} N_l \cdot k \cdot X_l$ - celkový počet míst, které na hraně $h \in H$ nabízejí za zvolenou časovou jednotku vozidla všech linek (obsluhujících tuto hranu) v každém směru.

Zápis podmínek zajišťujících dostatečnou nabídku míst do optimalizačního software Xpress – IVE uvedený v této podobě je značně nepohodlný, proto se definuje linkově – hranová incidenční matice A, kdy $a_{lh} \in \{0,1\}$.

Když linka $l \in L_0$ neobsluhuje hranu $h \in H$, potom $a_{lh} = 0$, když linka $l \in L_0$ obsluhuje hranu $h \in H$, potom $a_{lh} = 1$.

- po zavedení matice A přejde podmínka (4.32) do tvaru:

$$\sum_{l \in L_0} a_{lh} \cdot N_l \cdot k \cdot X_l \geq q_h \quad pro\ h \in H \tag{4.34}$$

Varianta matematického modelu Ib - maximalizace minimální poměrné rezervy

Varianta Ib matematického modelu je rozšířenou variantou modelu předchozího. V souladu s textem týkajícím se zaváděných typů proměnných přibude do modelu i proměnná modelující minimální poměrnou rezervu. Nad rámec modelu ve variantě Ia je množina vstupních dat rozšířena o údaj představující počet vozidel, které má dopravce k dispozici. Zavedením uvedeného údaje přestává být množina přípustných řešení ve směru optimalizace neohraničená.

Soustavou omezujících podmínek musí být zajištěno, že na každé hraně bude nabídnut minimálně takový počet míst, který odpovídá požadavku při zohlednění minimální poměrné rezervy a celkový počet vozidel rozdělený mezi linky nepřekročí disponibilní počet vozidel. Podmínka zajišťující nabídku míst současně vytváří také vazbu mezi hodnotami proměnných X_l a hodnotou proměnné y.

Matematický model ve variantě Ib bude mít tvar:

$$max\ f(y) = y \tag{4.35}$$

za podmínek:

$$K \geq \sum_{l \in L_0} X_l \tag{4.36}$$

$$\sum_{l \in L_0} a_{lh} \cdot N_l \cdot k \cdot X_l \geq q_h \cdot y \quad pro\ h \in H \tag{4.37}$$

$$X_l \in Z^+ \cup \{0\} \qquad pro\ l \in L_0 \tag{4.38}$$

$$y \geq 0 \tag{4.39}$$

Pozn.:

Máme např. 2 situace rozmístění vozidel mezi linky, ve kterých vyjdou hodnoty minimální poměrné rezervy 0,6 a 0,98. Vyšší míru nepřípustnosti vykazuje řešení s hodnotou účelové funkce 0,6.

Aby bylo možno splnit průměrné požadavky cestujících na každé hraně, musí minimální poměrná rezerva nabývat hodnoty minimálně 1. Nabude – li minimální poměrná rezerva po optimalizaci hodnoty např. 0,9, znamená to, že na minimálně jedné hraně v síti nabízíme méně, než činí průměrný požadavek (v tomto případě o 10 % méně míst, než činí průměrný požadavek na této hraně).

Mohlo by se zdát, že problém odstraníme doplňující omezující podmínkou $y \geq 1$, která může nahradit i obligatorní podmínku vztahující se k proměnné *y*. Tento přístup však v sobě skrývá určité úskalí, které se projeví v případech, kdy při nedostatečném počtu vozidel nelze dosáhnout hodnoty účelové funkce minimálně 1 (ale např. hodnoty 0,999). V uvedeném případě bude množina přípustných řešení prázdná, úloha může být pro řešící software úlohou neřešitelnou. Pro proměnnou *y* je tedy vhodnější zavést klasickou obligatorní podmínku, přičemž vyjde – li hodnota proměnné y po optimalizaci z intervalu $\langle 0, 1)$, řešitel získá informaci, že dosažené řešení není přípustné a zároveň získá informaci o míře nepřípustnosti nejlepšího dosaženého řešení. V případě varianty matematického modelu Ib se dá očekávat, že řešící algoritmus rozdělí v důsledku maximalizace hodnoty účelové funkce mezi linky všechna vozidla, která jsou k dispozici.

Varianta matematického modelu II - heterogenní vozový park (jeden druh dopravního prostředku, více typů vozidel z hlediska kapacity)

Varianta matematického modelu IIa - minimalizace počtu vozidel

Vstupními údaji pro variantu IIa budou:

- J - množina typů vozidel,
- N_l - počet oběhů vozidla na lince $l \in L_0$ za zvolenou časovou jednotku [h^{-1}] (počet oběhů za jednotku času bude uvažován konstantní pro všechny typy vozidel),
- k_j - kapacita vozidel typu $j \in J$ [míst],
- q_h – rozhodující intenzita cestujících na hraně $h \in H$ [osob.h^{-1}],
- X_{lj} - počet vozidel typu $j \in J$ přidělených lince $l \in L_0$ [vozidel].

V tomto modelu se připouští, že libovolný typ vozidla lze nasadit na libovolnou linku.

Jestliže:

$$\sum_{j \in J} X_{lj} = 0 - \text{ linka není v provozu pro } l \in L_0 \tag{4.40}$$

$$\sum_{j \in J} X_{lj} > 0 - \text{ linka je v provozu pro } l \in L_0 \tag{4.41}$$

Soustavou omezujících podmínek musí být, analogicky jako v případě varianty Ia, zajištěno, že pro každou hranu bude počet nabízených míst minimálně takový, jako je rozhodující intenzita cestujících na dané hraně.

Matematický model ve variantě IIa má tvar:

$$min\, f(x) = \sum_{l \in L_0} \sum_{j \in J} X_{lj} \tag{4.41}$$

za podmínek:

$$\sum_{l \in L_0} \sum_{j \in J} a_{lh} \cdot N_l \cdot k_j \cdot X_{lj} \geq q_h \quad pro\ h \in H \tag{4.43}$$

$$X_{lj} \in Z^+ \cup \{0\} \qquad pro\ \ l \in L_0, j \in J \tag{4.44}$$

Varianta matematického modelu IIb - maximalizace minimální poměrné rezervy

Vstupními údaji pro variantu IIb budou:

- rozsah vstupních dat odpovídá variantě IIa,
- K_j – počet vozidel typu $j \in J$,

Soustavou omezujících podmínek musí být zajištěno, že na každé hraně bude nabídnut minimálně takový počet míst, který odpovídá průměrnému požadavku při zohlednění minimální poměrné rezervy a celkový počet vozidel rozdělený mezi linky nepřekročí disponibilní počet vozidel. Musí být vytvořena podmínka zajišťující nabídku míst, která bude současně vytvářet vazbu mezi hodnotami proměnných X_{lj} a hodnotou proměnné y.

Matematický model ve variantě IIb má tvar:

$$max\ f(y) = y \qquad (4.45)$$

za podmínek:

$$\sum_{l \in L_0} X_{lj} \leq K_j \qquad \text{pro } j \in J \qquad (4.46)$$

$$\sum_{l \in L_0} \sum_{j \in J} a_{lh} \cdot N_l \cdot k_j \cdot X_{lj} \geq q_h \cdot y \quad pro\ h \in H \qquad (4.47)$$

$$y \geq 0 \qquad (4.48)$$

$$X_{lj} \in Z^+ \cup \{0\} \qquad pro\ \ l \in L_0, j \in J \qquad (4.49)$$

Varianta matematického modelu III - heterogenní vozový park (více druhů dopravních prostředků, více typů vozidel v rámci jednoho druhu z hlediska kapacity)

Varianta matematického modelu IIIa - minimalizace počtu vozidel:

Vstupními údaji pro variantu IIIa budou:

- J_i - množina typů vozidel v rámci druhu dopravního prostředku $i \in I$,
- N_l - počet oběhů vozidla na lince $l \in L_0$ za jednotku času [h^{-1}] (počet oběhů za jednotku času bude uvažován konstantní pro všechny druhy dopravních prostředků a typy vozidel),
- k_{ij} - kapacita vozidel (počet míst) druhu $i \in I$, typu $j \in J_i$ [míst],

- q_h – rozhodující intenzita cestujících na hraně $h \in H$ [osob.h^{-1}],
- T – prohibitivní konstanta [-],
- X_{lij} - počet vozidel přidělených lince $l \in L_0$, druhu $i \in I$, typu $j \in J_i$.
- z_{li} – proměnná modelující přiřazení druhu dopravního prostředku $i \in I$ lince $l \in L_0$ (z_{li} = 1, druh $i \in I$ bude přiřazen lince $l \in L_0$; z_{li} = 0, druh $i \in I$ nebude přiřazen lince $l \in L_0$).

Protože by se mohlo stát, že řešení bude takové, kdy linku bude obsluhovat více druhů dopravních prostředků (což se v praxi vyskytuje maximálně při mimořádnostech provozu), doplní se do modelu omezení, které zajistí v praxi nepsaný předpoklad, a to že každá linka $l \in L_0$ bude obsluhována maximálně jedním druhem dopravního prostředku.

Soustavou omezujících podmínek musí být zajištěno, že na každé hraně bude nabídnut minimálně takový počet míst, který odpovídá průměrnému požadavku, na každou linku bude nasazen maximálně jeden druh dopravního prostředku a dále musí být zajištěna provázanost hodnot proměnných X_{lij} a z_{li}.

Matematický model ve variantě IIIa má tvar:

$$min f(x) = \sum_{l \in L_0} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} X_{lij} \tag{4.50}$$

za podmínek:

$$\sum_{l \in L_0} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} a_{lh} \cdot N_l \cdot k_{ij} \cdot X_{lij} \geq q_h \quad pro\ h \in H \tag{4.51}$$

$$\sum_{i \in I} z_{li} \leq 1 \quad pro\ l \in L_0 \tag{4.52}$$

$$\sum_{j \in J_i} X_{lij} \leq z_{li} \cdot T \quad pro\ l \in L_0, i \in I \tag{4.53}$$

$$X_{lij} \in Z^+ \cup \{0\} \quad pro\ l \in L_0, j \in J_i \tag{4.54}$$

$$z_{li} \in \{0,1\} \quad pro\ l \in L_0, i \in I \tag{4.55}$$

Varianta matematického modelu IIIb - maximalizace minimální poměrné rezervy

Vstupními údaji pro variantu IIIb budou:

- rozsah vstupních dat odpovídá variantě IIIa,
- K_{ij} – počet vozidel druhu $i \in I$ typu $j \in J_i$,

Soustavou omezujících podmínek musí být zajištěno, že na každé hraně bude nabídnut minimálně takový počet míst, který odpovídá průměrnému požadavku při zohlednění minimální poměrné rezervy a celkový počet vozidel rozdělený mezi linky nepřekročí disponibilní počet vozidel. Podmínka zajišťující nabídku míst současně vytváří vazbu mezi hodnotami proměnných X_{lij} a hodnotou proměnné y. Dále musí být zajištěno, že na každou linku bude nasazen maximálně jeden druh dopravního prostředku a musí být zajištěna provázanost hodnot proměnných X_{lij} a z_{li}.

Matematický model ve variantě IIIb má tvar:

$$\max f(y) = y \tag{4.56}$$

za podmínek:

$$\sum_{l \in L_0} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} a_{lh} \cdot N_l \cdot k_{ij} \cdot X_{lij} \geq q_h \cdot y \quad pro\ h \in H \tag{4.57}$$

$$\sum_{i \in I} z_{li} \leq 1 \qquad pro\ l \in L_0 \tag{4.58}$$

$$\sum_{j \in J_i} X_{lij} \leq z_{li} \cdot T \qquad pro\ l \in L_0, i \in I \tag{4.59}$$

$$\sum_{l \in L_0} X_{lij} \leq K_{ij} \qquad pro\ i \in I,\ j \in J_i \tag{4.60}$$

$$X_{lij} \in Z^{+} \cup \{0\} \qquad pro\ l \in L_0, i \in I, j \in J \tag{4.61}$$

$$z_{li} \in \{0,1\} \qquad pro\ l \in L_0, i \in I \tag{4.62}$$

$$y \geq 0 \tag{4.63}$$

V kapitole 4 budou obě metody aplikovány na konkrétním příkladu.

4.3 Transformace matematického modelu pro optimalizačního software Xpress – IVE

V této podkapitole bude vysvětlen postup transformace matematického modelu do optimalizačního software Xpress – IVE. Software Xpress – IVE umožňuje řešení úloh lineárního programování a jeho demoverze je volně dostupná na internetových stránkách distributora, kterým je společnost FICO [http://www.fico.com/en/Products/DMTools /xpress-overview/Pages/Xpress-Optimizer.aspx].

Po nainstalování software a spuštění programu se objeví pracovní okno optimalizačního softwaru. Text programu se zapisuje do prostředního pracovního panelu a člení se na tři základní části.

1, deklarační část programu,
2, část programu obsahující zápis vlastního modelu,
3, část programu obsahující výpis hodnot výsledku.

Text programu začíná klíčovým slovem *model*. Za slovem model následuje název programu, tento název si uživatel volí sám. V dalším řádku se uvede text *uses „mmxprs“*, který inicializuje knihovnu řešících metod.

V první části programu, tzv. deklarační části textu programu, se nejdříve napíše klíčové slovo *declarations*. Tato část textu programu slouží k definování konstant a proměnných, které jsou do modelu zavedeny. Není – li konstanta typu pole, deklaruje se:

a: real

Konstanty typu pole lze v textu programu např. definovat takto:

a:array(1..n)of real

Tímto zápisem se definuje reálná konstanta a_i pro rozsah $i= 1..n$. Proměnné typu pole se definují analogicky, jediný rozdíl je v tom, že místo textu *real* je uveden text *mpvar*. Např. proměnná X_l se deklaruje:

x:array(linky)of mpvar

Není – li proměnná typu pole, deklaruje se ve tvaru:

x: mpvar

Po nadefinování všech konstant a proměnných lze deklarační část uzavřít klíčovým slovem *end – declarations*.

Po uzavření deklarační části následuje druhá část programu, která je věnována vlastnímu zápisu matematického modelu. Matematický model se skládá z účelové funkce a soustavy omezujících podmínek. Omezující podmínky lze vypisovat jednotlivě nebo pomocí příkazu cyklus – *forall*.

V textu programu nesmí být opomenuty obligatorní podmínky, jsou – li definičními obory množina nezáporných celých čísel nebo množina hodnot 0 a 1. Je – li požadavek, aby proměnné nabývaly celočíselných nezáporných hodnot, podmínku bude v textu programu nahrazovat zápis:

forall(l in L)X(l)is_integer

Je – li požadavek, aby proměnná byla bivalentní (nabývala hodnot 0 a 1), bude mít zápis v textu programu nahrazující podmínku např. tvar:

forall(l in L)X(l)is_binary

Je-li požadavek, aby proměnná nabývala pouze nezáporných hodnot, není zapotřebí do textu programu definovat. Software nezápornost proměnných automaticky předpokládá. To znamená, že pokud není v programu požadavek na celočíselné nezáporné a bivalentní hodnoty, počítá software s tím, že všechny proměnné jsou nezáporné.

U konstant typu pole se dále napíše maticový zápis vstupních údajů. Veličiny, které nejsou typu pole, se zde rovněž zapíší.

Ve třetí části programu se definují požadavky na výpisy výstupních hodnot. V případě uplatnění požadavku na výpis výstupní hodnoty se použije příkaz *writeln*. Příkaz lze např. zapsat takto:

writeln(„pocet“,getobjval)

Pomocí příkazu *writeln* vypíše optimalizační software za text „*pocet*“ hodnotu účelové funkce. Zapíše – li se požadavek na výpis ve tvaru:

writeln(„pocet“,getsol)

vypíše optimalizační software za text „*pocet*“ hodnotu proměnné odpovídající zvolenému označení.

Je – li proměnná typu pole, lze opět využít příkazu *forall*. Podmínka bude mít např. tvar:

forall(l in L, j in J)writeln("Počel vozidel na lince",l,"typu",j," je",getsol(x(l,j)))

Na základě uvedeného příkazu vypíše optimalizační software hodnoty všech proměnných x_{lj}

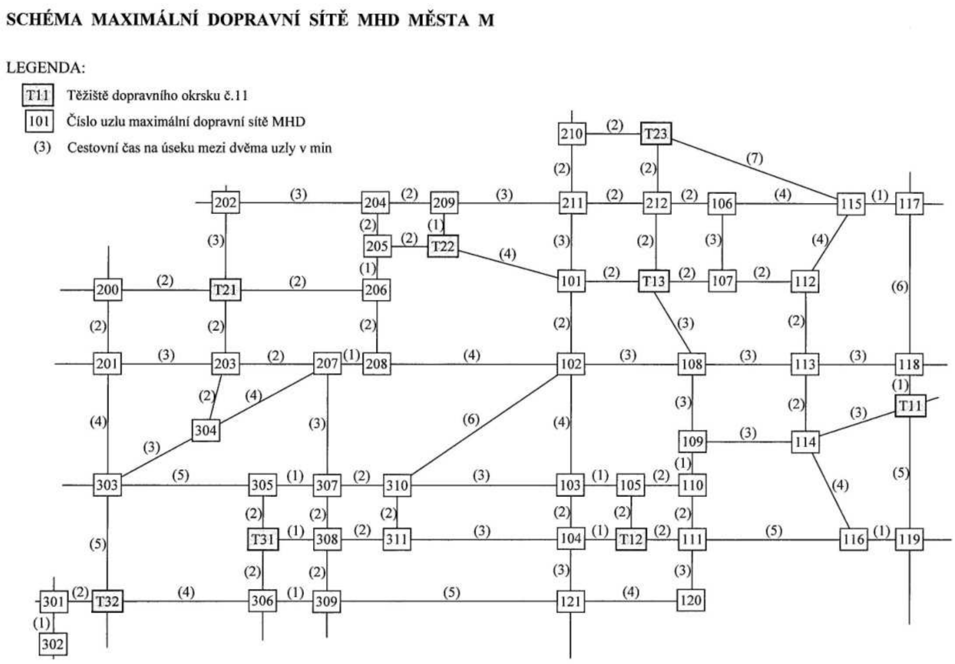
Text programu se ukončí klíčovým slovem *end – model*. Poté už můžeme přejít k samotnému spuštění optimalizačního výpočtu. Výpočet se spustí tlačítkem Run.

Pokud jsme zadali požadavek výpisu výstupních hodnot, optimalizační software tyto hodnoty vypíše do pravého pracovního panelu. Pokud někde v programu nastala chyba, ať už syntaktického nebo logického charakteru, software nás na tuto chybu upozorní v dolním nebo pravém panelu pracovního prostředí.

5 Aplikace vybraných metod v podmínkách zadané dopravní sítě

V této kapitole bude proveden návrh sítě linek na zadané dopravní síti pomocí obou výše uvedených metod – Metody založené na analýze současného stavu přemísťování osob a metody PRIVOL.

Návrhy budou provedeny v podmínkách dopravní sítě odpovídající maximální dopravní síti, která je vstupem pro metodu založenou na analýze současného stavu přemísťování osob znázorněné na obr. č.6.



Obr. č.6 – Schéma maximální dopravní sítě

Město je rozděleno do tří zón skládajících se z osmi dopravních okrsků. Každému vrcholu sítě je přiřazen určitý kód nesoucí v sobě informaci o příslušnosti k jedné ze dvou skupin vrcholů (viz teorie k uvedené metodě popsaná v kapitole 3 – krok 1). Např. označení vrcholu 305 znamená, že jde o vrchol 5 zařazený v zóně 3. Označení vrcholu T13 v sobě nese informaci, že se jedná o těžiště okrsku 3 v zóně 1.

Společným vstupním údajem pro obě metody budou dále:

- matice meziokrskových vztahů,
- cestovní rychlost po jednotlivých úsecích dopravní sítě,
- doba zdržení vozidla na konečné zastávce,
- druhy dopravních prostředků, typy vozidel a jejich kapacity.

Matici meziokrskových vztahů udává tab. č.2. Jsou v ní uvedeny intenzity cestujících odpovídající intenzitám v průměrné špičkové hodině.

Tab. č.2 – Matice meziokrskových přepravních vztahů [$osob.h^{-1}$]

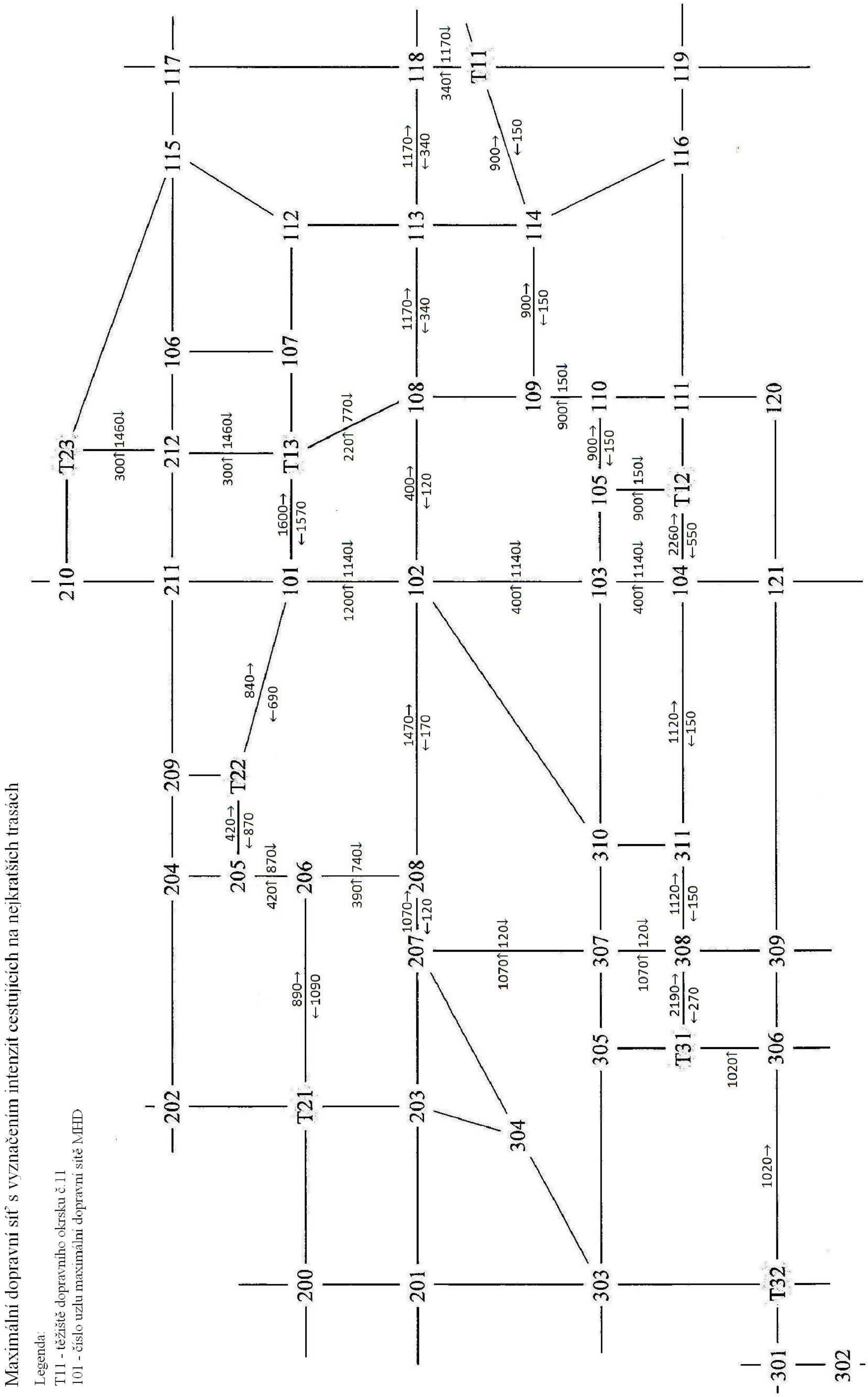
Č.okrsku	T11	T12	T13	T21	T22	T23	T31	T32
T11		150	220	120				
T12	150		350	500			150	
T13	220	130		250	100			
T21	400	220	200			50	120	
T22	200	240	150	400				
T23	350	550	220	220	120			
T31	250	250	250	50	120	250		
T32	500	120	350		50			

Cestovní rychlost po všech úsecích dopravní sítě je uvažována v_c=24 $km.h^{-1}$. Doba zdržení vozidla na konečné zastávce je uvažována ve výši 6 minut. Je rozhodováno mezi dvěma druhy dopravních prostředků – trolejbusy a autobusy, přičemž u každého druhu dopravního prostředku bude vybíráno ze dvou typů vozidel – standardního vozidla s kapacitou 80 míst a kloubového vozidla s kapacitou 150 míst.

V rámci řešení bude uvažováno, že cestující volí při přepravě mezi těžišti dopravní sítě nejkratší trasy. V důsledku takto zvolené strategie cestování vznikají v maximální dopravní síti přepravní proudy uvedené v tab. č.3 a znázorněné na obr č.7.

Tab. č.3 – Tabulka nejkratších tras mezi těžišti

Z – DO	Trasa	Intenzita přepravního proudu [osob.h^{-1}]		Vzdálenost	
		tam	zpět	[km]	[min]
T11 – T12	T11-114-109-110-111-T12	150	150	4,4	11
T11 – T13	T11-118-113-112-107-T13	220	220	4	10
T11 – T21	T11-118-113-108-102-208-206-T21	120	400	7,2	18
T12 – T11	T12-111-110-109-114-T11	150	150	4,4	11
T12 – T13	T12-111-110-109-108-T13	350	130	4,4	11
T12 – T21	T12-105-103-102-208-206-T21	50	220	6	15
T12 – T31	T12-104-311-308-T31	150	250	2,8	7
T13 – T11	T13-107-112-113-118-T11	220	220	4	10
T13 – T12	T13-108-109-110-111-T12	130	350	4,4	11
T13 – T21	T13-101-T22-205-206-T21	250	200	4,4	11
T13 – T22	T13-101-T22	100	150	2,4	6
T21 – T11	T21-206-208-102-108-113-118-T11	400	120	7,2	18
T21 – T12	T21-206-208-102-103-105-T12	220	50	2,4	6
T21 – T13	T21-206-205-T22-101-T13	200	250	4,4	11
T21 – T23	T21-206-205-T22-209-211-212-T23	50	220	5,2	13
T21 – T31	T21-203-207-307-305-T31	120	50	4	10
T22 – T11	T22-101-102-108-113-118-T11	200	-	6	15
T22 – T12	T22-101-102-103-104-T12	240	-	5,2	13
T22 – T13	T22-101-T13	150	100	2,4	6
T22 – T21	T22-205-206-T21	400	-	2	5
T23 – T11	T23-212-T13-108-113-118-T11	350	-	5,6	14
T23 – T12	T23-212-T13-108-109-110-111-T12	550	-	6	15
T23 – T13	T23-212-T13	220	-	1,6	4
T23 – T21	T23-212-211-209-T22-205-206-T21	220	50	5,2	13
T23 – T22	T23-210-211-209-T22	120	-	3,2	8
T31 – T11	T31-308-311-104-103-105-110-109-114-T11	250	-	7,2	18
T31 – T12	T31-308-311-104-T12	250	150	2,8	7
T31 – T13	T31-308-307-310-102-101-T13	250	-	6	15
T31 – T21	T31-305-307-207-203-T21	50	120	4	10
T31 – T22	T31-305-307-207-208-206-205-T22	120	-	4,8	12
T31 – T23	T31-308-307-310-102-101-T13-212-T23	250	-	7,6	19
T32 – T11	T32-306-T31-305-307-310-103-105-10-109-114-T11	500	-	9,6	24
T32 – T12	T32-306-309-308-311-104-T12	120	-	5,2	13
T32 – T13	T32-303-304-207-208-102-101-T13	350	-	8,4	21
T32 – T22	T32-306-309-308-307-207-208-206-205-T22	50	-	7,2	18



Obr. č.7 – Záznam intenzity přepravního proudu [osob.h^{-1}]

5.1 Návrh sítě linek metodou založenou na analýze současného stavu přemísťování osob

5.1.1 Přípravná fáze metody

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3, skládá se přípravná fáze ze tří kroků a to sestavení zakódované dopravní sítě, sestavení matice meziokrskových přepravních vztahů a přiřazení přepravních vztahů na maximální dopravní síť. Protože jsou pro potřeby předložené práce všechny tři kroky společné oběma metodám, byly zařazeny do úvodu kapitoly 5.

5.1.2 Návrhová fáze metody

Návrhová fáze metody je pokryta krokem č.4. Jak již bylo uvedeno při návrhu sítě linek, vytváří se přímá spojení v relacích, ve kterých hodinová intenzita pro průměrnou špičkovou hodinu činí minimálně v jednom směru 250 osob. V případě zadané dopravní sítě je tento předpoklad splněn u 16 relací, a to:

Tab. č.4 – Tabulka přímých spojení mezi těžišti

Relace	Intenzita přepravního proudu [osob.h^{-1}]	Relace	Intenzita přepravního proudu [osob.h^{-1}]	Relace	Intenzita přepravního proudu [osob.h^{-1}]
T11 – T21	400	T21 – T11	400	T31 – T11	250
T12 –T13	350	T21 – T13	250	T31 – T12	250
T12 – T31	250	T22 – T21	400	T31 – T13	250
T13 – T12	350	T23 – T11	350	T31 – T23	250
T13 – T21	250	T23 – T12	550	T32 – T11	500
				T32 – T13	350

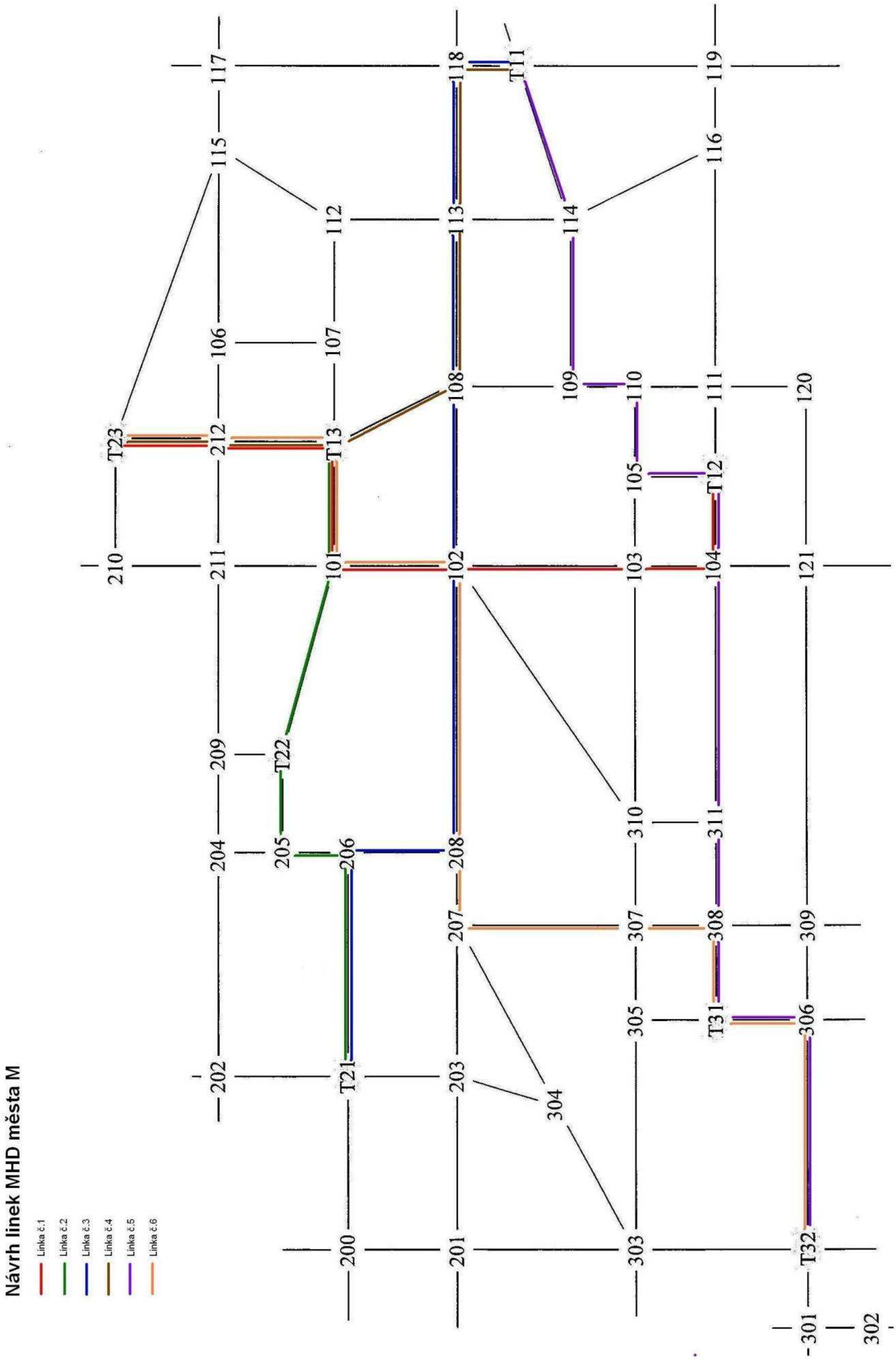
Po vyhodnocení poloh tras jednotlivých linek bylo zjištěno, že po některých úsecích existuje poptávka po přepravě, ovšem s ohledem na nízkou intenzitu v nich není vedena žádná linka. Při návrhu se uvedené intenzity převádějí na hrany, u kterých je patrné, že po nich bude vedena linka (jde o nejkratší trasy spojující těžiště s intenzitou minimálně 250 osob.h^{-1} v jednom směru). Dalším krokem je prověření, zda není možno redukovat počet linek při zachování požadavku týkajícího se zřízení přímého spojení. V řešené síti je uvedená redukce možná v deseti případech. Redukce počtu linek je uvedena v tab. č.5.

Tab. č.5 – Tabulka redukce počtu linek

	Linka č.1	Linka č.2	Linka č.3	Linka č.4	Linka č.5	Linka č.6
Relace	T12 – T13	T13 – T21	T11 – T21	T23 – T11	T12 – T31	T31 – T13
	T13 – T12	T21 – T13	T21 – T11		T31 – T11	T31 – T23
	T23 – T12	T22 – T21			T31 – T12	T32 – T13
					T32 – T11	

Z tabulky je patrné, že lze snížit počet linek. Redukcí počtu linek však dodržíme přímé spojení mezi těžišti, kde je intenzita minimálně 250 osob.h^{-1} v jednom směru. Např. linkou č.1 lze obsloužit požadavky, které vznikají mezi těžišti uvedenými v tab. č.5. U dalších redukcí postupujeme analogicky jako v případě linky č.1.

Navržená soustava linek po redukci je znázorněna na obr. č.8.



Obr. č.8 – Návrh sítě MHD s vyznačením linek

5.1.3 Hodnotící fáze

Pro potřeby provozního a ekonomického vyhodnocení vyžaduje metoda následující soustavu doplňujících vstupních údajů:

Součinitel přepravní nerovnoměrnosti................................ $\varepsilon = 2{,}0$
Čas provozu denně.. 5,00 – 23,00 h
Čas provozu ve špičce v den Po-Pá .... 5,00 – 8,00 h
13,00 – 17,00 h
Součinitel využití kapacity vozidla ve špičce .... $X_{šp}$=1.0
Součinitel využití kapacity vozidla v sedle.......................... X_{se}=0,8
Součinitel využití jízd .... $\beta = 0{,}94$
Součinitel technické pohotovosti v den Po-Pá..................... $\alpha_{tp} = 0{,}85$
Provozní rezerva z počtu vozidel v provozu........................ 10 %
Počet řidičů na jedno vozidlo v provozu .... 2,1 osob.voz^{-1}
Počet dílenských prac. na 1 vozidlo evidenčního stavu....... 0,67 osob.voz^{-1}
Podíl počtu THP a jiných pracovníků na celkovém počtu... 14 %

Pro potřeby modelového výpočtu je uvažováno s umístěním garáží dopravce do těžiště T13.

Ekonomické údaje:

Autobusová doprava:

Investiční náklady objektů, zařízení a vybavení................. 1 100 mil. Kč
Pořizovací cena 1 standardního autobusu........................... 3,8 mil. Kč
Pořizovací cena 1 kloubového autobusu............................. 5,6 mil. Kč
Přímé náklady kromě odpisů vozidel.................................. 27,47 Kč.100 mkm^{-1}
Odpisy vozidel .... 17 % ročně
Nepřímé náklady... 6,25 Kč.100 mkm^{-1}

Trolejbusová doprava:

Investiční náklady objektů, zařízení a vybavení................. 1 200 mil. Kč
Investiční náklady trakčního systému na 1 km tratě............ 9,1 mil. Kč.km^{-1}
Pořizovací cena 1 standardního trolejbusu .... 9,5 mil. Kč.voz^{-1}
Pořizovací cena 1 kloubového trolejbusu .... 15,2 mil. Kč.voz^{-1}

Přímé náklady kromě odpisů vozidel a trakčního systému 23,55 Kč.100 mkm^{-1}
Odpisy vozidel .... 17 % ročně
Odpisy trakčního systému na 1 km tratě za rok.................. 0,33 mil. Kč.km.rok^{-1}
Nepřímé náklady.. 5,45 Kč.100 mkm^{-1}

Jako první v pořadí bude v rámci hodnotící části proveden krok 5. V tomto kroku se pro každou linku vypočítají náklady podle jednotlivých druhů dopravních prostředků a na základě vypočítaných hodnot se zvolí vhodný druh (druh vykazující nižší náklady). V textu práce budou uvedeny výpočty vztahující se k lince č.1 spojující uzly T12 a T23. Výpočty pro ostatní linky se provedly analogicky a budou v textu práce uvedeny pouze v souhrnné tabulce.

- výpočet intervalu linky v sedle $i_{šp}$:

$$i_{šp} = \frac{K \cdot \gamma \cdot 60}{O_{h\max}} = \frac{150 \cdot 1 \cdot 60}{1140} = 7{,}89 = 7 \text{ min}$$

Pro potřeby modelového výpočtu bude uvažováno s výběrem vozidel z vyšší kapacitou, výhodou tohoto přístupu je, že k obsluze linek může být využit nižší počet vozidel. S tímto úzce souvisí např. počet řidičů, který se odvíjí od počtu vozidel nasazovaných do provozu.

- výpočet intervalu linky v sedle i_{se}:

$$i_{se} = i_{šp} \cdot \varepsilon = 7 \cdot 2 = 14 \text{ min}$$

- výpočet provozní délky linky l_z:

Dle schématu maximální dopravní sítě byl určen cestovní čas na lince č.1 na t_c = 15,0 min. Čas zdržení na konečné zastávce je zvolen na 6 min.

$$l_z = \frac{v_c \cdot t_c}{60} = \frac{24 \cdot 15}{60} = 6 \text{ km}$$

- výpočet oběžného času t_o:

$$t_o = 2 \cdot \left(\frac{l_z \cdot 60}{v_c} + t_k \right) = 2 \cdot \left(\frac{6 \cdot 60}{24} + 6{,}0 \right) = 42 \text{ min}$$

- výpočet počtu vozidel ve špičce $N_{šp}$:

$$N_{šp} = \frac{t_o}{i_{šp}} = \frac{42}{7} = 6 \text{ vozidel}$$

- výpočet počtu vozidel v sedle N_{se}:

$$N_{se} = \frac{t_o}{i_{se}} = \frac{42}{14} = 3 \text{ vozidla}$$

- výpočet počtu vozidel v evidenci N_{ev}:

$$N_{ev} = \frac{N_{šp}}{\alpha_{tp}} = \frac{6}{0{,}85} = 7{,}05 = 8 \text{ vozidel}$$

- výpočet času linky t_l:

$$t_l = \frac{1}{2} \cdot t_o = \frac{1}{2} \cdot 42 = 21 \text{ min}$$

- výpočet počtu ujetých kilometrů na lince ve špičce $L_{šp}$:

$$L_{šp} = N_{šp} \cdot \frac{{}^{šp}t_{pr} \cdot 60}{t_l} \cdot l_z = 6 \cdot \frac{7 \cdot 60}{21{,}0} \cdot 6 = 720 \text{ km}$$

- výpočet počtu ujetých kilometrů na lince v sedle L_{se}:

$$L_{se} = N_{se} \cdot \frac{{}^{se}t_{pr} \cdot 60}{t_l} \cdot l_z = 3 \cdot \frac{11 \cdot 60}{21{,}0} \cdot 6 = 566 \text{ km}$$

- výpočet počtu ujetých kilometrů za jeden den na lince v rozmezí Po-Pá ${}^{1}L_{Po\text{-}Pá}$:

$${}^{1}L_{Po-Pá} = L_{šp} + L_{se} = 566 + 720 = 1286 \text{ km} \cdot \text{den}^{-1}$$

- výpočet dopravního výkonu v rozmezí Po – Pá ${}^{1}L_{km,Po\text{-}Pá}$:

$${}^{1}L_{km,Po-Pá} = {}^{1}L_{Po-Pá} + L_{01} = 1286 + 39{,}6 + 14{,}4 = 1340 \text{ km} \cdot \text{den}^{-1}$$

- výpočet počtu ujetých kilometrů za 1 den na lince o So, Ne a svátcích ${}^{1}L_{So,Ne,S}$:

$${}^{1}L_{So,Ne,S} = N_{se} \cdot \frac{t_{pr} \cdot 60}{t_l} \cdot l_z = 3 \cdot \frac{18 \cdot 60}{21{,}0} \cdot 6 = 926 \text{ km} \cdot \text{den}^{-1}$$

- výpočet dopravního výkonu v rozmezí So – Ne, S ${}^{1}L_{km,So\text{-}Ne,S}$:

$$ {}^{1}L_{km,So-Ne,S} = {}^{1}L_{So-Ne,S} + L_{02} = 926 + 13{,}2 + 4{,}8 = 944\ \mathrm{km} \cdot \mathrm{den}^{-1} $$

- výpočet celkových ujetých kilometrů na dané lince za rok L_r:

$$ L_r = D_{prac} \cdot {}^{1}L_{Po-Pá} + D_{So,Ne,S} \cdot {}^{1}L_{So,Ne,S} = 250 \cdot 1286 + 115 \cdot 926 = 427\,990\ \mathrm{km} \cdot \mathrm{rok}^{-1} $$

- výpočet místových kilometrů na dané lince za rok ${}^{mkm}L_r$:

$$ {}^{mkm}L_r = L_r \cdot K = 427\,990 \cdot 150 = 64\,198\,500\ \mathrm{mkm} \cdot \mathrm{rok}^{-1} $$

- výpočet 100 místových kilometrů na dané lince za rok ${}^{100mkm}L_r$:

$$ {}^{100mkm}L_r = \frac{{}^{mkm}L_r}{100} = \frac{64\,198\,500}{100} = 641\,985\,100\ \mathrm{mkm} \cdot \mathrm{rok}^{-1} $$

- výpočet poměrné délky linky pro stanovení odpisů na trolejové vedení l_{zpom}:

$$ l_{zpom} = \frac{v_c \cdot t_{cpom}}{60} = \frac{24 \cdot 15}{60} = 6\ \mathrm{km} $$

Protože výpočet pro linku č.1 byl prováděn jako první v pořadí, odpovídala cestovní doba t_{cpom} součtu cestovních dob přes jednotlivé úseky obsluhované linkou č.1. V případě dalších linek, které mají společné úseky s trasou linky č.1, se cestovní doby přes tyto úseky do t_{cpom} těchto linek již nezapočítávají.

- výpočet vlastních nákladů na autobusy za rok VN_A:

$$ VN_A = \frac{\left(VN_{př} + VN_{nepř}\right) \cdot {}^{100mkm}L_r + \left(O_a \cdot C_{st} \cdot N_{ev}\right)}{1000} $$

$$ VN_A = \frac{(27{,}47 + 6{,}25) \cdot 641\,985 + (0{,}17 \cdot 5\,600\,000 \cdot 8)}{1000} = 29\,263\,734\ \mathrm{Kč} $$

-výpočet vlastních nákladů na trolejbusy za rok VN_{Tr}:

$$ VN_{Tr} = \frac{\left(VN_{př} + VN_{nepř}\right) \cdot {}^{100mkm}L_r + \left(O_t \cdot C_t \cdot N_{ev}\right) + \left(l_{zpom} \cdot O_{tr}\right)}{1000} $$

$$ VN_{Tr} = \frac{(23{,}55 + 5{,}45) \cdot 641\,985 + (0{,}17 \cdot 15\,200\,000 \cdot 8) + (6{,}0 \cdot 330\,000)}{1000} = 41\,269\,565\ \mathrm{Kč} $$

Volba dopravního prostředku MHD pro každou navrženou linku:

Tab.č.5 – Vlastní náklady na jednotlivých linkách za rok provozu

Linka č.	N_{ev}	l_z	VN-autobusy	VN-trolejbusy
	[voz.]	[km]	[tisKč]	[tisKč]
1	8	6	29263,134	41269,565
2	5	4,4	17830,348	26140,809
3	5	7,2	19909,221	27929,12
4	5	5,6	17369,14	22215,512
5	10	9,6	48219,469	61102,72
6	9	10	42100,046	55839,612

Z tabulky č.5 je patrné, že vlastní náklady na provoz autobusů jsou v případě všech linek nižší, než vlastní náklady na provoz trolejbusů. Z uvedeného důvodu budou všechny linky obsluhovány autobusovou dopravou. Pakliže budou vlastní náklady na provoz jediným kritériem, dá se očekávat, že autobusová doprava bude upřednostněna vždy.

Výpočet provozních údajů byl podrobně v předchozím textu proveden pro linku č.1. Výsledky pro další linky jsou uvedeny v souhrnné tabulce č.6.

Tab.č.6 – Provozní údaje navržených linek

Linka č.	$i_{šp}$	i_{se}	t_c	l_z	t_o	$N_{šp}$	N_{se}	Dopravní výkon Po - Pá	Dopravní výkon v So, Ne a S
	[min]	[min]	[min]	[km]	[min]	[voz.]	[voz.]	[km.den^{-1}]	[km.den^{-1}]
1	7	14	15	6	42	6	3	1339,714	943,714
2	10	20	11	4,4	34	4	2	802,870	567,858
3	12	24	18	7,2	48	4	2	950,4	664,8
4	11	22	14	5,6	40	4	2	896	627,2
5	7	14	24	9,6	60	9	5	2437,2	1794
6	8	16	25	10	62	8	4	2065,083	1436,748

Pro výpočet dopravních výkonů je rovněž zapotřebí znát počet kilometrů ujetých bez cestujících. Tyto vzdálenosti jsou uvedeny v tab. č.7.

Tab. č.7 – Tabulka ujetých kilometrů z a do garáže

Jízdy z a do garáže ve T13							
Linka č.	Konečná zastávka	Dojezdový čas na konečnou zastávku (min)	Dojezdová vzdálenost na konečnou zastávku (km)	Počet jízd ze T13 na konečnou zastávku a zpět denně (Po-Pá)	Počet jízd ze T23 na konečnou zastávku a zpět denně (So,Ne,S)	Celkem km za den (Po-Pá)	Celkem km za den (So,Ne,S)
1	T12	11	4,4	9	3	39,6	13,2
	T23	4	1,6	9	3	14,4	4,8
2	T13	0	0	0	2	0	0
	T21	11	4,4	6	2	26,4	8,8
3	T11	10	4	6	2	24	8
	T21	11	4,4	6	2	26,4	8,8
4	T11	10	4	6	4	24	16
	T23	4	1,6	6	4	9,6	6,4
5	T32	23	9,2	13	5	119,6	46
	T11	10	4	13	5	52	20
6	T32	23	9,2	12	4	110,4	36,8
	T23	4	1,6	12	4	19,2	6,4

- počet vozidel v evidenci celkem N_{ev}:

$$N_{evc} = \frac{\sum_{l=1}^{6} N_{šp_l}}{\alpha_{tp}} = \frac{6+4+4+4+9+8}{0{,}85} = 41{,}76 = 42 \text{ vozidel}$$

- celkový počet řidičů $N_{řid}$:

$$N_{řid} = 2{,}1 \cdot \sum_{l=1}^{6} N_{šp_l} = 2{,}1 \cdot (6+4+4+4+9+8) = 73{,}5 = 74 \text{ osob}$$

Počet řidičů závisí na celkovém počtu vozidel nasazených do sítě linek, nikoliv na celkovém počtu vozidel v evidenčním stavu.

- počet pracovníků údržby a oprav $N_{ÚaO}$:

$$N_{ÚaO} = 0{,}67 \cdot N_{evc} = 0{,}67 \cdot 42 = 28{,}14 = 29 \text{ osob}$$

- celkový počet pracovníků v podniku N_{celk}:

$$N_{celk} = \frac{N_{řid} + N_{ÚaO}}{1 - N_{THPP}} = \frac{74 + 29}{1 - 0{,}14} = 119{,}8 = 120 \text{ osob}$$

- počet THP pracovníků N_{THP}:

$$N_{THP} = N_{THPP} \cdot N_{celk} = 0{,}14 \cdot 120 = 16{,}8 = 17 \text{ osob}$$

- výpočet investičních nákladů na vozidla INV:

$$INV = \frac{N_{cšpAs}}{\alpha_{tp}} \cdot C_{st} + \frac{N_{cšpAk}}{\alpha_{tp}} \cdot C_{kl} = \frac{35}{0{,}85} \cdot 5\,600\,000 = 230\,588\,235 \text{ K}\check{c}$$

- výpočet celkových investičních nákladů IN:

$$IN = INV + INO = 230\,588\,235 + 1\,100\,000\,000 = 1\,330\,588\,235 \text{ Kč}$$

- výpočet celkových úplných vlastních nákladů za rok VN_{celk}:

$$VN_{celk} = \sum_{l=1}^{6} VN_l$$

$$VN_{celk} = (29\,263+17\,830+19\,909+17\,369+48\,219+42\,100).1000 = 174\,685\,000 \text{ Kč}$$

Hodnoty výsledných údajů za podnik jsou uvedeny ve shrnující tabulce č.8.

Tab. č.8 – Tabulka výsledných údajů za podnik

Ukazatel	Jednotka	Hodnota
Evidenční stav vozidlového parku	[-]	42
Počet řidičů	[-]	74
Počet pracovníků THP	[-]	17
Počet pracovníků údržby	[-]	29
Počet pracovníků podniku celkem	[-]	120
Dopravní výkony celkem za rok	[km.rok^{-1}]	2 924 768,2
	[místkm.rok^{-1}]	401 635 943,7
Investiční náklady na vozidlo (*INV*)	[Kč]	235 529 412
Investiční náklady (*IN*)	[Kč]	1 330 588 235
Úplné vlastní náklady	[Kč.rok^{-1}]	174 685 000

5.2 Metoda PRIVOL

Metoda PRIVOL byla provedena pro všechny varianty modelů uvedené v kapitole 4, tj. celkem bylo provedeno osm experimentů.

V textu kapitoly 5 bude podrobněji prezentován výpočet v případě varianty Ia, tj. varianty, při které se minimalizuje počet vozidel v podmínkách homogenního vozidlového parku.

Vstupní údaje:

Konstanty:

- počet linek L=6 (trasy linek v širší množině linek odpovídají trasám navrženým na základě metody založené na analýze současného stavu přemísťování osob),
- počet úseků H=31,
- počet oběhů vozidla za zvolenou časovou jednotku N_l =1,43; 1,76; 1,25; 1,5; 1; 0,97 [h^{-1}],
- kapacita vozidla k = 80 [míst.$vozidlo^{-1}$],
- intenzita cestujících na hraně q_h = 1020, 1020 , …, 740, 1090 [osob.h^{-1}],

Proměnné:

– počet vozidel, které přidělíme lince X_l [vozidla],
– celkem bude v modelu vystupovat šest proměnných.

Matematický model bude uveden pouze náznakově a má tvar:

$$\min f(x) = \sum_{l=1}^{6} X_l$$

za podmínek (soustava omezujících podmínek má 31 strukturálních podmínek):

$1{,}43 \cdot 150 \cdot X_1 \geq 1020$

.

.

$0{,}97 \cdot 150 \cdot X_6 \geq 1090$

$X_l \in Z^+ \cup \{0\}$ pro l =1,2,..,6

V další kapitole bude popsána transformace tohoto modelu do optimalizačního softwaru Xpress – IVE.

5.3 Transformace lineárního modelu

Po uvedení záhlaví textu programu bude v deklarační části definován počet linek ”L” a počet úseků dopravní sítě ”H”. Zápisy budou mít následující tvary:

L=1..6

H=1..31

Ve variantě matematického modelu Ia vystupuje pouze jedna proměnná X typu pole. Tato proměnná se vztahuje k jednotlivým linkám. Z tohoto důvodu se v deklarační části objeví následující text:

X:array(L)of mpvar

Dále se v modelu musí definovat konstanty typu pole. V matematickém modelu se vyskytují 3 skupiny konstant. První skupina konstant reprezentuje skutečnost, zda linka obsluhuje hranu či nikoliv (je vyjádřeno pomocí matice A). Při modelování skutečnosti, zda daná linka obsluhuje hranu se vychází z obr. č.9. V deklarační části programu se proto objeví zápis:

a:array(L,H)of real

Druhá skupina konstant reprezentuje počty oběhů vozidla na jednotlivých linkách za zvolené časové období (v případě výpočtu za hodinu). V deklarační části programu se proto objeví zápis:

N:array(L)of real

Poslední skupina konstant reprezentuje rozhodující hodinové intenzity cestujících na úsecích. V deklarační části programu se proto objeví zápis:

q:array(H)of real

Dále je v modelu i konstanta, která není typu pole. Tato konstanta reprezentuje kapacitu jednotlivých vozidel. V deklarační části programu se proto ještě objeví zápis:

k:real

V tomto okamžiku jsou již definovány všechny konstanty a proměnné vystupující v modelu. Z tohoto důvodu je možno deklarační část zápisu ukončit příkazem *end – declarations.*

Po deklarační části následuje další část textu programu, a to část, která umožňuje zápis vlastního modelu. Tato část bude zahájena maticovým zápisem jednotlivých konstant typu pole. Jako první bude nadefinována konstanta ”*a*”.

V textu programu se objeví zápis:

a::[0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,
0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,
0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,
1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]

Dále budou nadefinovány hodnoty konstanty ”*N*”. Zápis v textu programu bude mít tvar:

N::[1.43,1.76,1.25,1.5,1,0.97]

Poslední definovanou konstantou typu pole je ”*q*”. Zápis v textu programu bude mít tvar:

q::[1020,1020,2190,1070,1070,1070,1470,1200,1570,1460,1460,1120,1120,2260,900, 900,900,900,900,1170,1170,1170,770,400,1140,1140,840,870,870,740,1090]

Jako poslední bude nadefinována konstanta”*k*”. Zápis v textu programu bude mít tvar:

k:=80

Následuje zápis obligatorních podmínek. Obligatorní podmínky se ve variantě Ia budou vztahovat pouze k proměnné X_l. Podmínka zajišťuje, že počty autobusů budou nezáporné celočíselné hodnoty. Zápis v textu programu bude mít tvar:

forall(l in L)X(l)is_integer

Další podmínka zajistí, že na dané hraně bude nabízeno minimálně tolik míst, kolik je průměrně požadováno. Zápis v textu programu bude mít následující tvar:

*forall(h in H)sum(l in L)a(l,h)*N(l)*k*X(l)>=q(h)*

Po nadefinování všech omezujících podmínek se zapíše účelová funkce, která vyjadřuje celkový počet vozidel přidělených linkám. Zápis účelové funkce bude mít tvar:

celk_pocet:=sum(l in L)X(l)

Úkolem je tento počet minimalizovat, proto se v textu programu ještě objeví příkaz pro minimalizaci účelové funkce. Příkaz lze zapsat takto:

minimize(celk_pocet)

V poslední části programu se zapíše požadavek na výpis hodnoty účelové funkce a hodnot jednotlivých proměnných. Pro výpis hodnoty účelové funkce bude mít zápis následující tvar:

writeln("Celkovy pocet autobusu:",getobjval)

Požadavek na výpis hodnot jednotlivých proměnných bude definován pomocí cyklu. Zápis bude mít následující tvar:

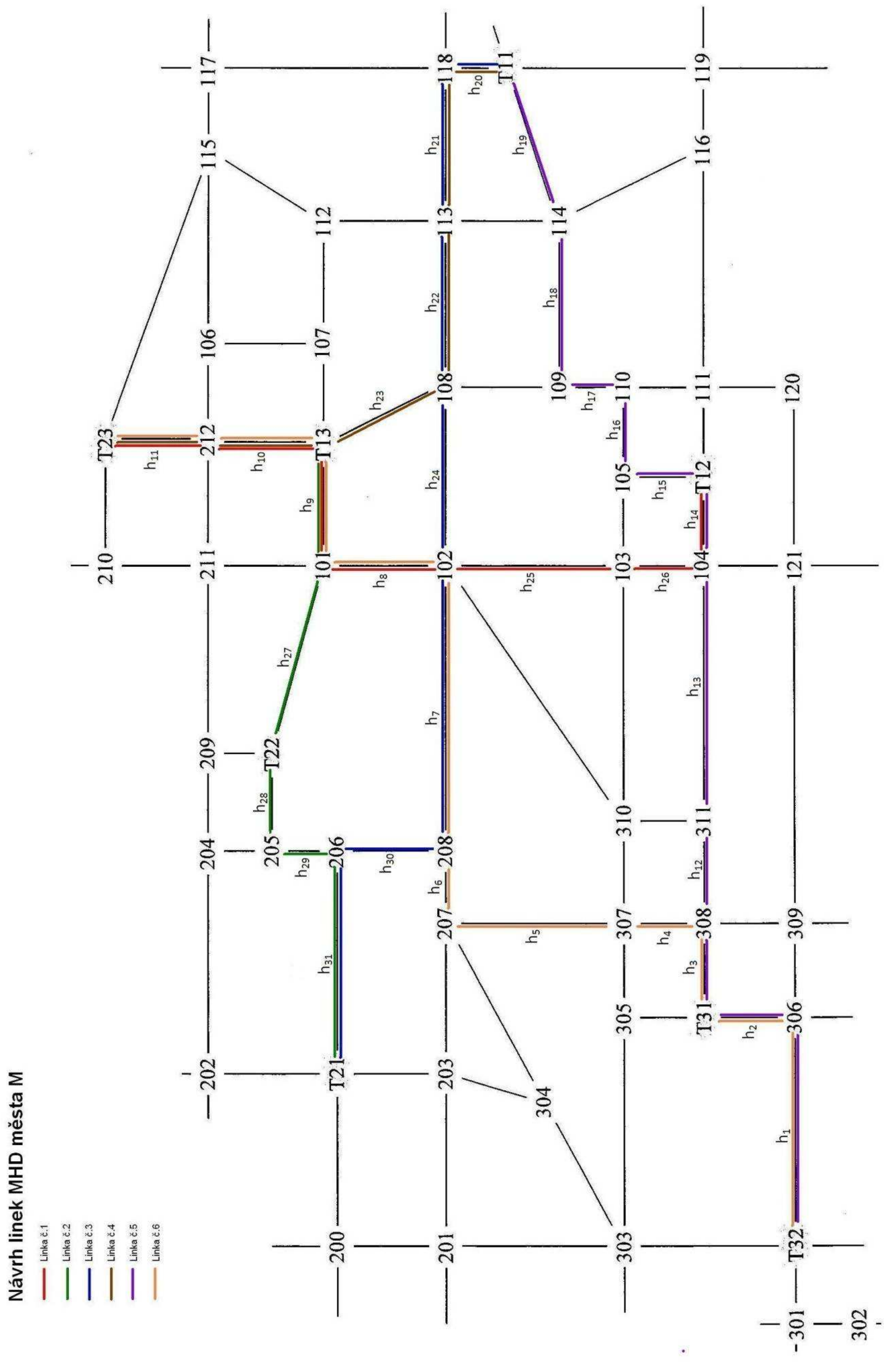
forall(l in L)writeln("x(",l,")=",getsol(X(l)))

V tomto okamžiku jsou v programu nadefinovány všechny podstatné části, a proto je možno text program ukončit klíčovým slovem *end – model*.

V dalším textu bude uveden kompletní text programu pro variantu Ia.

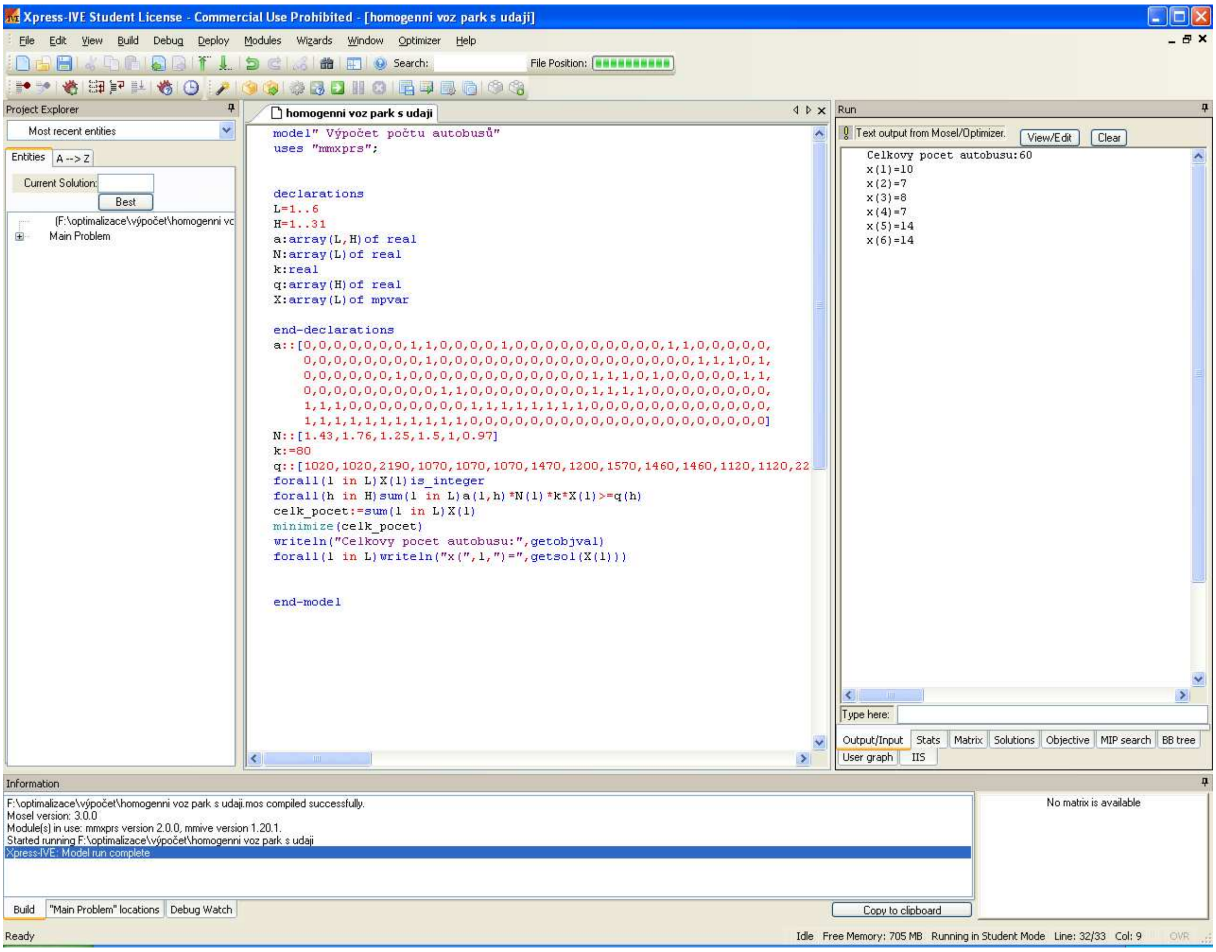
```
model" Výpočet počtu autobusů"
uses "mmxprs";
declarations
L=1..6
H=1..31
a:array(L,H)of real
N:array(L)of real
k:real
q:array(H)of real
X:array(L)of mpvar
end-declarations
a::[0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,
0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
N::[1.43,1.76,1.25,1.5,1,0.97]
k:=80
```

```
q::[1020,1020,2190,1070,1070,1070,1470,1200,1570,1460,1460,1120,1120,2260,900,900,
900,900,900,1170,1170,1170,770,400,1140,1140,840,870,870,740,1090]
forall(l in L)X(l)is_integer
forall(h in H)sum(l in L)a(l,h)*N(l)*k*X(l)>=q(h)
celk_pocet:=sum(l in L)X(l)
minimize(celk_pocet)
writeln("Celkovy pocet autobusu:",getobjval)
forall(l in L)writeln("x(",l,")=",getsol(X(l)))
end-model
```



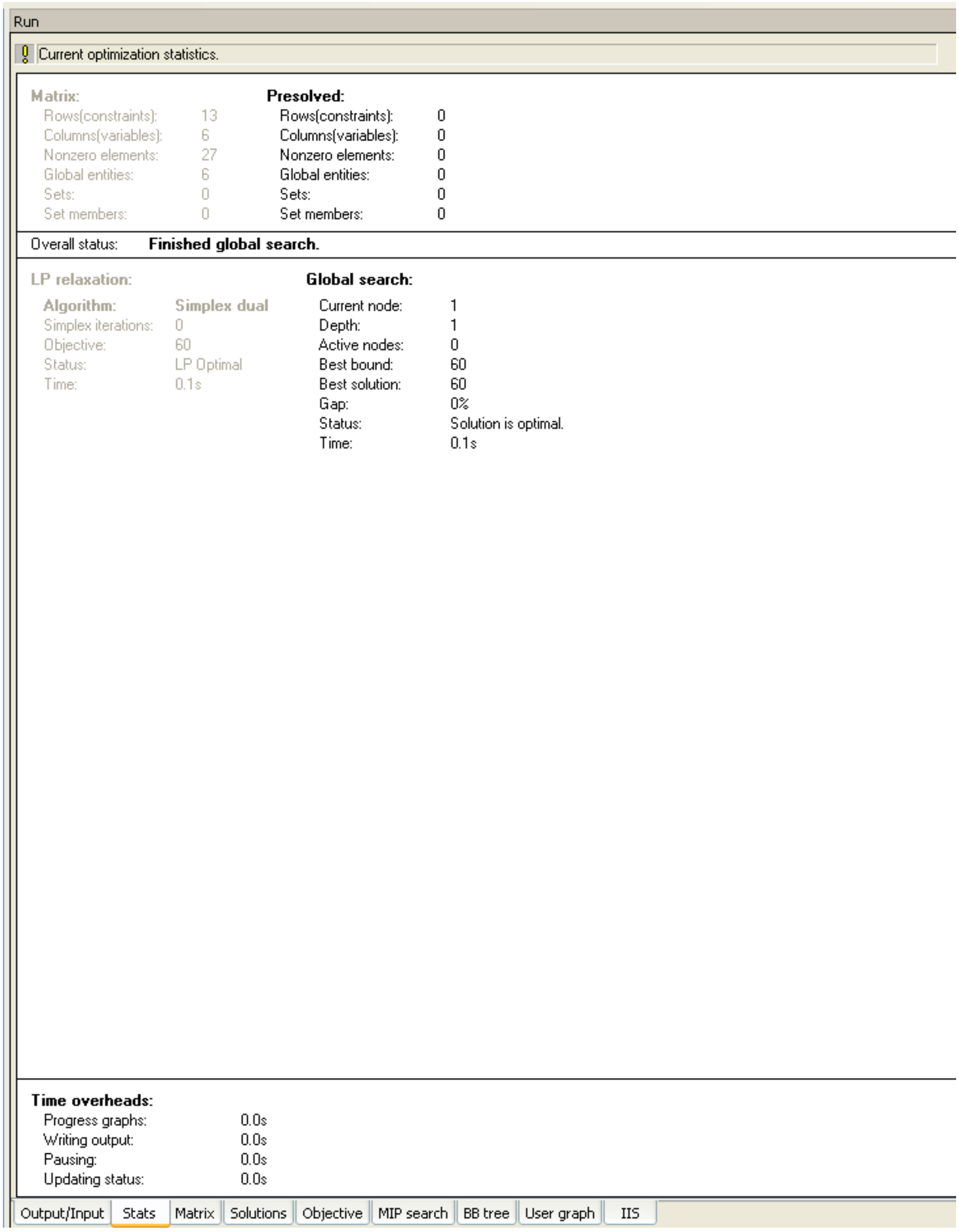
Obr. č.9 – Vyznačené vedení sítě linek s číselným označením úseků

Zápis textu programu v pracovním prostředí optimalizačního software společně s výpisem získaných výsledků je znázorněn na obr. č.10.



Obr. č.10– Pracovní prostředí software Xpress – IVE

Optimalitu získaného řešení je možno deklarovat kopií panelu „Stats“, ve kterém se výsledek řešení po ukončení výpočtu zaznamenává, viz obr. č.11.



Obr. č. 11– Panel stats optimalizačního software

Pozn.

Při stanovení minimálních počtů autobusů přidělených linkám, může nastat problém a to, že u některé linky může vzhledem ke stanovené oběžné době vzniknout neceločíselný linkový interval. To je v situacích, kdy oběžná doba není násobkem počtu vozidel přidělených linkám. Tento problém lze vyřešit několika způsoby. Tyto způsoby budou dále rozebrány podrobněji.

1, proměnlivý linkový interval

U tohoto způsobu nebude striktně požadováno, aby byl na lince zaveden pravidelný linkový interval.Např. při době oběhu 42 min a počtu přidělených vozidel 5, lze volit linkový interval např. 8 min, 8 min, 8 min, 9 min a 9 min.Výhodou uvedeného postupu bude, že není zapotřebí zvyšovat počet přidělených vozidel. Nevýhoda plyne již ze samotného označení varianty – na lince nebude zachován pravidelný linkový interval.

2, zvýšení hodnoty linkového intervalu

U tohoto způsobu je možno zachovat požadavek na jednotný linkový interval. Např. při době oběhu 42 min a počtu 5 vozidel, dojde k navýšení linkového intervalu z 8 na 9 min. Nevýhodou uvedené varianty je to, že může dojít ke snížení nabídky kapacity míst na lince za zvolené časové období, pro zachování nabídky kapacity míst lze nasadit vozidla s vyšší kapacitou. Výhodou uvedeného postupu bude, že nedojde k navýšení počtu vozidel přidělených linkám.

3, zařazení dalších vozidel na linku

Tato varianta přichází v úvahu, je – li striktně vyžadováno přiklonění se k nižší celočíselné hodnotě linkového intervalu. Např. při době oběhu 42 min a počtu 5 vozidel a intervalu linky 8 min, nastane situace, kdy musíme zařadit na tuto linku ještě jedno vozidlo. Jedná se o vozidlo, které navyšuje počet vozidel na lince. Nevýhodou této varianty je zvýšení počtu vozidel a tím i vyšší provozní náklady.

Na závěr této kapitoly bude uvedena úvaha, která může být argumentem svědčícím ve prospěch zvyšování počtu vozidel nad nezbytný počet stanovený podle vzorce (4.6).

V reálném provozu se totiž musí uvažovat s možnou nepohotovostí vozidla. Ke zjištění počtu záložních vozidel existuje několik metod. Jedna z nich je založena na výpočtu ustálené pohotovosti vozidel. Pohotovost vozidla je pravděpodobnost, že se objekt nachází v provozuschopném stavu. Pohotovost vychází ze střední doby provozu a střední doby obnovy a dá se vypočítat následovně:

$$A = \frac{T_{sp}}{T_{sp} + T_{su}} \text{ [-]} \tag{5.1}$$

T_{sp} – střední doba provozu [h]

T_{su} – střední doba obnovy [h]

Obnova je proces, kdy po jeho ukončení se objekt z hlediska spolehlivosti nachází ve stavu „jako nový“.

Př.

Máme dva typy vozidel s různými hodnotami ustálené pohotovostí. Vozidlo 1 má ustálenou pohotovost 0,8 a vozidlo 2 má ustálenou pohotovost 0,9. Rozhoduje se o tom, jaký typ vozidla bude pořízen. Otázka zní, o kolik bude třeba navýšit stav vozidlového parku u typu 1 a 2, za podmínky že denně je zapotřebí vypravit 100 vozidel.

Bude – li pořizován typ 1, bude muset být požadavek na počet vypravených vozidel navýšen o 20 vozidel, bude - li pořizován typ 2, bude muset být požadavek na počet vypravených vozidel navýšen o 10 vozidel. Počet vozidel v evidenčním stavu bude u vozidel typu 1 - 120 a u vozidel typu 2 - 110. Z pohledu počtu vozidel je tedy výhodnější volit vozidla s vyšší ustálenou pohotovostí.

6 Porovnání výsledků obou metod

V této části předložené diplomové práce bude provedeno porovnání dosažených výsledků při návrhu tras linek oběma metodami. Před samotným porovnáním však musí být zvolena kritéria, podle kterých bude porovnání výsledků obou metod provedeno.

K porovnání budou zvolena následující kritéria (jejich hodnoty přímo vyplývají z výsledků použitých metod):

1, počet vozidel přidělený všem linkám,

2, minimální poměrná rezerva v navržené síti,

3, linkové intervaly.

Hodnoty zvolených kritérií pro jednotlivá řešení byly zpracovány do tabulky č.9, 10, 11.

Tab. č.9 – Porovnání výsledků metod dle zvolených kritérií

	Metoda PRIVOL								Metoda přemísťování osob														
	Počet vozidel (špička) [-]	Minimální poměrná rezerva (špička) [-]	Linkový interval (špička) [min]						Počet vozidel (špička) [-]	Minimální poměrná rezerva (špička) [-]	Linkový interval [min]											
											špička						sedlo					
			L1	L2	L3	L4	L5	L6			L1	L2	L3	L4	L5	L6	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Homogenní vozidlový park k = 80	60	1	4,2	4,85	6	5,7	4,3	4,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Homogenní vozidlový park k = 150	34	1,014	7	8,5	12	10	7,5	7,7	35	0,69	7	10	12	6	7	8	14	20	24	12	14	16
Dva druhy vozidel, dva typy vozidel	34	1,014	7	8,5	12	10	7,5	7,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jeden druh, dva typy vozidel	34	1,014	7	8,5	12	10	7,5	7,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

V uvedené tabulce je uvedeno srovnání výsledků obou zadaných metod. V tabulce jsou uvedeny počty vozidel pro různé typy vozidlových parků. Dále jsou zde uvedeny hodnoty minimálních poměrných rezerv pro jednotlivá řešení a vypočítané linkové intervaly pro každou linku.

Tab. č.10 – Porovnání výsledků metod pro každou linku

	Metoda PRIVOL								Metoda přemísťování osob			
	Počet vozidel (špička) [-]				Linkový interval (špička) [min]				Počet vozidel [-]		Linkový interval [min]	
	Homogenní vozidlový park k = 80	Homogenní vozidlový park k = 150	Dva druhy vozidel, dva typy vozidel	Dva druhy vozidel	Homogenní vozidlový park k = 80	Homogenní vozidlový park k = 150	Dva druhy vozidel, dva typy vozidel	Dva druhy vozidel	Homogenní vozidlový park k = 150		Homogenní vozidlový park k = 150	
									špička	sedlo	špička	sedlo
Linka 1	10	6	6	6	4,2	7	7	7	6	3	7	14
Linka 2	7	4	4	4	4,87	8,5	8,5	8,5	4	2	10	20
Linka 3	8	4	4	4	6	12	12	12	4	2	12	24
Linka 4	7	4	4	4	5,7	10	10	10	4	2	6	12
Linka 5	14	8	8	8	4,29	7,5	7,5	7,5	9	5	7	14
Linka 6	14	8	8	8	4,42	7,7	7,7	7,7	8	4	8	16

V této tabulce jsou opět vypsány hodnoty kritérií. Narozdíl od tab. č.9, jsou zde uvedeny počty přidělených vozidel pro každou linku.

Tab. č.11 – Porovnání výsledků metod pro kapacitu vozidla 150 osob

	Metoda PRIVOL		Metoda přemísťování osob			
	Homogenní vozidlový park (k = 150)		Homogenní vozidlový park (k = 150)			
	Počet vozidel (špička) [-]	Linkový interval (špička) [min]	Počet vozidel [-]		Linkový interval [min]	
			špička	sedlo	špička	sedlo
Linka 1	6	7	6	3	7	14
Linka 2	4	8,5	4	2	10	20
Linka 3	4	12	4	2	12	24
Linka 4	4	10	4	2	6	12
Linka 5	8	7,5	9	5	7	14
Linka 6	8	7,7	8	4	8	16
∑	34	-	35	18	-	-
Minimální poměrná rezerva (špička) [-]	1,014		0,69			

V této tabulce jsou opět porovnávány výsledky obou metod. Jedná se o variantu, při které byl proveden srovnávací výpočet pomocí metody založené na analýze současného stavu přemísťování osob, tj. byl uvažován vozidlový park s kapacitou 150 míst. Tab. č.11 vznikla kombinací výsledků uvedených v tab. č.9 a tab. č.10.

7 Závěr

V diplomové práci byl proveden návrh sítě linek pomocí dvou zadaných metod – metody založené na analýze současného stavu přemísťování osob a metody PRIVOL.

V úvodních kapitolách byla pozornost věnována obecné charakteristice městské hromadné dopravy, zejména z hlediska jejího významu pro města a městské aglomerace. Dále zde byly charakterizovány metody, které slouží pro návrh sítě linek MHD. V kapitole č. 5 byl proveden návrh sítě linek pro zadanou dopravní síť pomocí dvou zvolených metod. Návrh sítě linek obsahuje schéma vedení linek po dopravní síti, počet vozidel, která jsou linkám přidělena, linkové intervaly a výpočet minimální poměrné rezervy. U metody založené na analýze současného stavu přemísťování osob je řešení doplněno o ekonomické zhodnocení, které tato metoda předpokládá. V kapitole č.6 se věnuji zhodnocení dosažených výsledků pomocí zvolených kritérií.

Výsledky obou metod byly rozdílné, což se dalo očekávat, protože každá z uvedených metod je založena na jiném principu. Mezi kritéria, která byla zvolena k porovnání výsledků patří počet vozidel přidělený linkám, linkové intervaly a minimální poměrná rezerva. U metody založené na analýze současného stavu přemísťování osob byl stanoven přidělených vozidel 35. U metody PRIVOL bylo vypočítáno, že minimálně je k zajištění provozu zapotřebí 34 vozidel. Pomocí metody PRIVOL byl sice navržen menší počet vozidel, negativem uvedeného řešení je však existence neceločíselných linkových intervalů (trvá-li dopravce na pravidelnosti). V práci jsou také uvedena doporučení, jak lze problém neceločíselných linkových intervalů řešit. Dle metody PRIVOL byly vybrány všechny linky z širší množiny linek a to z důvodu, že se na každé lince nalézá úsek, který je obsluhován pouze touto linkou.

Dalším z kritérií byla minimální poměrná rezerva. U metody založené na analýze současného stavu přemísťování osob vyšla tato hodnota 0,69, což znamená, že na některém úseku nabízíme méně míst, než je průměrně požadováno. U metody PRIVOL vyšla hodnota 1,014, což znamená, že nabízíme více míst, než je průměrně požadováno.

Ze získaných výsledků nelze pochopitelně činit jednoznačné zobecňující závěry o tom, která metoda je pro návrh vedení linek výhodnější, protože každá z nich se vyznačuje určitými výhodami a nevýhodami. Takové závěry by bylo možno pochopitelně učinit teprve při otestování uvedených metod na větším počtu reálných úloh, nejlépe při ověření navržených výsledků v praktickém provozu. Tady však zůstává základní otázkou, zda se v budoucnu vyskytne dopravce, který by byl případné výsledky ochoten odzkoušet v praxi, příp. který bude alespoň ochoten výsledky podrobit analýze, příp. dalšími podnětnými připomínkami přispět k jejich zdokonalení.

Jak již bylo uvedeno v úvodu práce, odborná literatura příliš mnoho zkušeností s porovnáváním výsledků různých metod neobsahuje. Zpracovanou diplomovou práci je tedy nutno chápat jako pokus o alespoň částečné vyplnění existující mezery v uvedené oblasti.

Seznam použité literatury

[1] SUROVEC, P.: Provoz a ekonomika silniční dopravy I. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2000, I. vydání, ISBN 80 – 7078 – 735 – X.

[2] PASTOR, O., TUZAR, A.: Teorie dopravních systémů. Praha:ASPI, 2007, I. vydání, 312 s., ISBN 978 – 80 – 7357 – 285 – 3.

[3] ČERNÝ, KLUVÁNEK, P.: Základy matematickej teorie dopravy. Bratislava: Veda, 1990, 279 s., ISBN 80 – 224 – 0099 – 8.

[4] WINKLER, J.: Vyhledávací studie možností optimalizace hromadné osobní dopravy. Bakalářská práce, VŠB – TU Ostrava, Institut dopravy, Ostrava 2009.

Seznam příloh

Příloha č.1

Zápis matematického modelu do optimalizačního software:

```
model I_a
uses "mmxprs";

declarations
L=1..6
H=1..31
a:array(L,H)of real
N:array(L)of real
k:real
q:array(H)of real
X:array(L)of mpvar

end-declarations
a::[0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
    0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,
    0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,
    0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,
    1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
    1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
N::[1.43,1.76,1.25,1.5,1,0.97]
k:=150
q::[1020,1020,2190,1070,1070,1070,1470,1200,1570,1460,1460,1120,1120,2260,900,900,
    900,900,900,1170,1170,1170,770,400,1140,1140,840,870,870,740,1090]
forall(l in L)X(l)is_integer
forall(h in H)sum(l in L)a(l,h)*N(l)*k*X(l)>=q(h)
celk_pocet:=sum(l in L)X(l)
minimize(celk_pocet)
writeln("Celkovy pocet autobusu:",getobjval,"ks.")
forall(l in L)writeln("x(",l,")=",getsol(X(l)))
end-model
```

Výpis výsledků:

Celkovy pocet autobusu:34ks.

x(1)=6

x(2)=4

x(3)=4

x(4)=4

x(5)=8

x(6)=8

Příloha č.2

Zápis matematického modelu do optimalizačního software:

```
model II_b_1
uses "mmxprs";

declarations
L=1..6
H=1..31
a:array(L,H)of real
n:array(L)of real

x:array(L)of mpvar
q:array(H)of real
y:mpvar

end-declarations
a::[0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
    0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,
    0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,
    0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,
    1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
    1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
n::[1.43,1.76,1.25,1.5,1,0.97]
k:=80
q::[1020,1020,2190,1070,1070,1070,1470,1200,1570,1460,1460,1120,1120,2260,900,900,
    900,900,900,1170,1170,1170,770,400,1140,1140,840,870,870,740,1090]
K:=60
sum(l in L)x(l)<=K
forall(h in H)sum(l in L)a(l,h)*n(l)*k*x(l)>=q(h)*y
forall(l in L)x(l)is_integer
pom_rezerva:=y
maximize(pom_rezerva)
writeln("Minimalni pomerna rezerva je: ",getobjval)
```

```
forall(l in L)writeln("Počet vozidel nasazených na linku ",l," je: ",getsol(x(l)))
writeln("Begin running model")
writeln("End running model")

end-model
```

Výpis výsledků:

Minimalni pomerna rezerva je: 1

Počet vozidel nasazených na linku 1 je: 10

Počet vozidel nasazených na linku 2 je: 7

Počet vozidel nasazených na linku 3 je: 8

Počet vozidel nasazených na linku 4 je: 7

Počet vozidel nasazených na linku 5 je: 14

Počet vozidel nasazených na linku 6 je: 14

Příloha č.3

Zápis matematického modelu do optimalizačního software:

```
model II_b_2
uses "mmxprs";

declarations
L=1..6
H=1..31
a:array(L,H)of real
n:array(L)of real

x:array(L)of mpvar
q:array(H)of real
y:mpvar

end-declarations
a::[0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,
        0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,
        0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,
        1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
        1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
n::[1.43,1.76,1.25,1.5,1,0.97]
k:=150
q::[1020,1020,2190,1070,1070,1070,1470,1200,1570,1460,1460,1120,1120,2260,900,900,
900,900,900,1170,1170,1170,770,400,1140,1140,840,870,870,740,1090]
K:=34
sum(l in L)x(l)<=K
forall(h in H)sum(l in L)a(l,h)*n(l)*k*x(l)>=q(h)*y
forall(l in L)x(l)is_integer
pom_rezerva:=y
maximize(pom_rezerva)
writeln("Minimalni pomerna rezerva je: ",getobjval)
```

```
forall(l in 1..6)writeln("Počet vozidel nasazených na linku ",l," je: ",getsol(x(l)))
writeln("Begin running model")
writeln("End running model")

end-model
```

Výpis výsledků:

Minimalni pomerna rezerva je: 1.01351

Počet vozidel nasazených na linku 1 je: 6

Počet vozidel nasazených na linku 2 je: 4

Počet vozidel nasazených na linku 3 je: 4

Počet vozidel nasazených na linku 4 je: 4

Počet vozidel nasazených na linku 5 je: 8

Počet vozidel nasazených na linku 6 je: 8

Příloha č.4

Zápis matematického modelu do optimalizačního software:

```
model II_a
uses "mmxprs";

declarations
L=1..6
H=1..31
J=1..2
a:array(L,H)of real
n:array(L)of real
k:array(J)of real
x:array(L,J)of mpvar
q:array(H)of real
end-declarations
a::[0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
        0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,
        0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,
        0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,
        1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
        1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
n::[1.43,1.76,1.25,1.5,1,0.97]
k::[80,150]
q::[1020,1020,2190,1070,1070,1070,1470,1200,1570,1460,1460,1120,1120,2260,900,900,
900,900,900,1170,1170,1170,770,400,1140,1140,840,870,870,740,1090]
forall(h in H)sum(l in L, j in J)a(l,h)*n(l)*k(j)*x(l,j)>=q(h)
forall(l in L, j in J)x(l,j)is_integer
min_pocet:=sum(l in L, j in J)x(l,j)
minimize(min_pocet)
writeln("Minimalni pocet je: ",getobjval)
forall(l in L, j in J)writeln("Počet vozidel na lince",l,"typu",j," je",getsol(x(l,j)))

end-model
```

Výpis výsledků:

Minimalni pocet je: 34

Počet vozidel na lince1typu1 je1

Počet vozidel na lince1typu2 je5

Počet vozidel na lince2typu1 je1

Počet vozidel na lince2typu2 je3

Počet vozidel na lince3typu1 je0

Počet vozidel na lince3typu2 je4

Počet vozidel na lince4typu1 je1

Počet vozidel na lince4typu2 je3

Počet vozidel na lince5typu1 je0

Počet vozidel na lince5typu2 je8

Počet vozidel na lince6typu1 je1

Počet vozidel na lince6typu2 je7

Příloha č.5

Zápis matematického modelu do optimalizačního software:

```
model II_b
uses "mmxprs";

declarations
L=1..6
H=1..31
J=1..2
a:array(L,H)of real
n:array(L)of real
k:array(J)of real
x:array(L,J)of mpvar
q:array(H)of real
K:array(J)of real
y:mpvar
end-declarations
a::[0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
    0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,
    0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,
    0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,
    1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
    1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
n::[1.43,1.76,1.25,1.5,1,0.97]
k::[80,150]
q::[1020,1020,2190,1070,1070,1070,1470,1200,1570,1460,1460,1120,1120,2260,900,900,
    900,900,900,1170,1170,1170,770,400,1140,1140,840,870,870,740,1090]
K::[4,30]
forall(j in J)sum(l in L)x(l,j)<=K(j)
forall(h in H)sum(l in L, j in J)a(l,h)*n(l)*k(j)*x(l,j)>=q(h)*y
forall(l in L, j in J)x(l,j)is_integer
pom_rezerva:=y
maximize(pom_rezerva)
```

```
writeln("Minimalni pomerna rezerva je: ",getobjval)
forall(l in L, j in J)writeln("Počet vozidel nasazených na linku",l,"typu",j," je:",getsol(x(l,j)))

end-model
```

Výpis výsledků:

Minimalni pomerna rezerva je: 1.01351

Počet vozidel nasazených na linku1typu1 je:1

Počet vozidel nasazených na linku1typu2 je:5

Počet vozidel nasazených na linku2typu1 je:1

Počet vozidel nasazených na linku2typu2 je:3

Počet vozidel nasazených na linku3typu1 je:0

Počet vozidel nasazených na linku3typu2 je:4

Počet vozidel nasazených na linku4typu1 je:1

Počet vozidel nasazených na linku4typu2 je:3

Počet vozidel nasazených na linku5typu1 je:0

Počet vozidel nasazených na linku5typu2 je:8

Počet vozidel nasazených na linku6typu1 je:1

Počet vozidel nasazených na linku6typu2 je:7

Příloha č.6

Zápis matematického modelu do optimalizačního software:

```
model III_a
uses "mmxprs";
declarations
L=1..6
I=1..2
J=1..2
H=1..31

n:array(L)of real
k:array(I,J)of real
q:array(H)of real
a:array(L,H)of real
T:real
x:array(L,I,J)of mpvar
z:array(L,I)of mpvar

end-declarations

n::[1.43,1.76,1.25,1.5,1,0.97]
k::[80,150,
    80,150]
q::[1020,1020,2190,1070,1070,1070,1470,1200,1570,1460,1460,1120,1120,2260,900,900,
    900,900,900,1170,1170,1170,770,400,1140,1140,840,870,870,740,1090]
a::[0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
    0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,
    0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,
    0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
    1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
    1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
T:=100
forall(h in H)sum(l in L, i in I, j in J)a(l,h)*n(l)*k(i,j)*x(l,i,j)>=q(h)
```

```
forall(l in L)sum(i in I)z(l,i)<=1
forall(l in L, i in I)sum(j in J)x(l,i,j)<=z(l,i)*T
forall(l in L, i in I,j in J)x(l,i,j)is_integer
forall(l in L, i in I)z(l,i)is_binary
celk_pocet:=sum(l in L, i in I, j in J)x(l,i,j)
minimize(celk_pocet)
writeln("Minimalni pocet vozidel je:",getobjval)
forall(l in L, i in I, j in J|getsol(x(l,i,j))>0)writeln("Pocet vozidel na lince ",l," druhu ",i,"
    typu ",j," je ",getsol(x(l,i,j)))
end-model
```

Výpis výsledků:

```
Minimalni pocet vozidel je:34
Pocet vozidel na lince 1 druhu 2 typu 2 je 6
Pocet vozidel na lince 2 druhu 2 typu 2 je 4
Pocet vozidel na lince 3 druhu 2 typu 2 je 4
Pocet vozidel na lince 4 druhu 2 typu 2 je 4
Pocet vozidel na lince 5 druhu 2 typu 2 je 8
Pocet vozidel na lince 6 druhu 2 typu 2 je 8
```

Příloha č.7

Zápis matematického modelu do optimalizačního software:

```
model III_b
uses "mmxprs";
declarations
L=1..6
I=1..2
J=1..2
H=1..31

n:array(L)of real
k:array(I,J)of real
q:array(H)of real
a:array(L,H)of real
T:real
x:array(L,I,J)of mpvar
z:array(L,I)of mpvar
K:array(I,J)of real
y:mpvar
end-declarations

n::[1.43,1.76,1.25,1.5,1,0.97]
k::[80,150,
    80,150]
q::[1020,1020,2190,1070,1070,1070,1470,1200,1570,1460,1460,1120,1120,2260,900,900,
    900,900,900,1170,1170,1170,770,400,1140,1140,840,870,870,740,1090]
a::[0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
    0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,
    0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,
    0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,
    1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
    1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
T:=100
```

```
K::[0,0,
    0,34]
forall(j in J, i in I)sum(l in L)x(l,i,j)<=K(i,j)
forall(h in H)sum(l in L, j in J, i in I)a(l,h)*n(l)*k(i,j)*x(l,i,j)>=q(h)*y
forall(l in L, j in J, i in I)x(l,i,j)is_integer
forall(l in L)sum(i in I)z(l,i)<=1
forall(l in L, i in I)sum(j in J)x(l,i,j)<=z(l,i)*T
forall(l in L, i in I)z(l,i)is_binary
pom_rezerva:=y
maximize(pom_rezerva)
writeln("Minimalni pomerna rezerva je: ",getobjval)
forall(l in L, i in I, j in J|getsol(x(l,i,j))>0)writeln("Pocet vozidel na lince ",l," druhu ",i,"
    typu ",j," je ",getsol(x(l,i,j)))
end-model
```

Výpis výsledků:

```
Minimalni pomerna rezerva je: 1.01351
Pocet vozidel na lince 1 druhu 2 typu 2 je 6
Pocet vozidel na lince 2 druhu 2 typu 2 je 4
Pocet vozidel na lince 3 druhu 2 typu 2 je 4
Pocet vozidel na lince 4 druhu 2 typu 2 je 4
Pocet vozidel na lince 5 druhu 2 typu 2 je 8
Pocet vozidel na lince 6 druhu 2 typu 2 je 8
```